

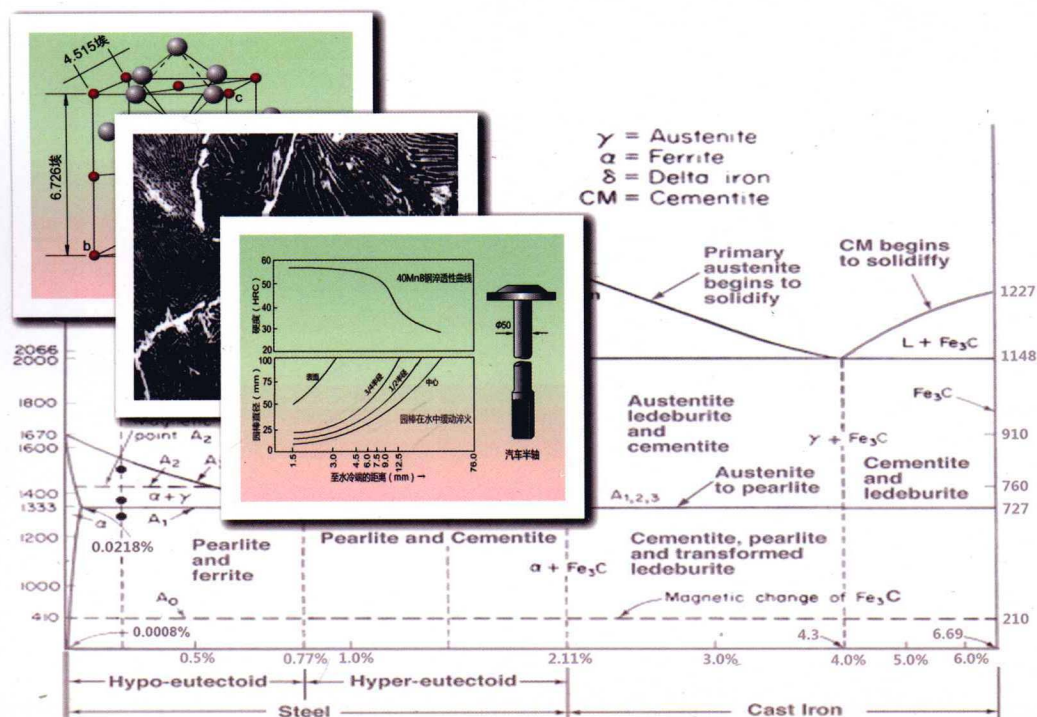
高等学校教材

工程材料

GONGCHENG CAILIAO

主 编 陈 曦

副主编 王志海 史晓亮 冯四平 彭 兆



- ➔ 全书分 **12** 章、**150** 余道难易程度不同的习题、**4** 个实验教学
- ➔ 作为高等院校机械类、近机类各专业教材，同时可供从事机械设计制造的工程技术人员参考

高等学校教材

工 程 材 料

主 编 陈 曦
副主编 王志海 史晓亮
冯四平 彭 兆

武汉理工大学出版社

· 武 汉 ·

内 容 简 介

本教材是依据高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革项目“机械类专业人才培养方案及教学内容和课程体系改革的研究与实践”的研究成果编写的。

本书主要论述了机械设计者和制造者必须具备的材料知识和有关的基本理论,介绍了各类工程材料的成分、组织结构与加工工艺方法和性能之间的关系,并以实例说明了如何根据机械零件的服役条件和性能要求合理地进行选材。

全书共分 12 章,包括工程材料的分类及性能、金属的晶体结构、纯金属的结晶、合金的结构与相图、金属材料的塑性变形、钢的热处理、合金钢、铸铁、有色金属及其合金、非金属材料、材料表面改性技术和机械零件材料的选用等内容。

本书可作为高等院校机械类、近机械类各专业教材,也可供从事机械设计和制造的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程材料/陈曦主编. —武汉:武汉理工大学出版社,2010.8

ISBN 978-7-5629-3160-7

I. ①工… II. ①陈… III. ①工程材料 IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 150334 号

出版发行:武汉理工大学出版社

武汉市洪山区珞狮路 122 号 邮编:430070

<http://www.techbook.com.cn> 理工图书网

印 刷 者:安陆市鼎鑫印务有限责任公司

经 销 者:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16

印 张:16.5

字 数:412 千字

版 次:2010 年 8 月第 1 版

印 次:2010 年 8 月第 1 次印刷

印 数:1—3000 册

定 价:27.00 元

如有印装质量问题,请与承印厂联系退换。

本社购书热线电话:(027)87394412 87383695 87384729

版权所有,盗版必究。

前 言

本教材是依据高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革项目“机械类专业人才培养方案及教学内容和课程体系改革的研究与实践”的研究成果编写的。

全书共分 12 章,主要论述了三个方面的内容:

- (1)工程材料的基本知识和相关的基本理论;
- (2)各类工程材料的成分、组织结构、加工工艺方法和性能之间的关系;
- (3)以实例说明如何根据机械零件的服役条件和性能要求合理地进行选材。

书中涵盖的主要内容有工程材料的分类及性能、金属的晶体结构、纯金属的结晶、合金的结构与相图、金属材料的塑性变形、钢的热处理、合金钢、铸铁、有色金属及其合金、非金属材料、材料表面改性技术和机械零件材料的选用等。其指导思想旨在从机械制造与设计类专业培养目标出发,使读者通过本教材的学习,能够了解工程材料的成分、组织和性能之间的相互关系及其变化规律,并具有根据机械零件的工作条件和性能要求合理地选用材料并制定出零件的加工工艺路线的初步能力。

本教材由陈曦担任主编。具体分工为:陈曦编写第 6、10、11 章;冯四平编写第 7、9、12 章;彭兆编写第 1、2、3 章;王志海编写第 4、8 章;史晓亮编写第 5、10 章。

主要由以上教师开发的 2004 年湖北省精品课程“工程材料”网址为:<http://jpkc.whut.edu.cn/gccl/welcome.htm>,可供师生共享。

在书中,编者参阅和借鉴了国内外出版的有关教材和资料,在此一并致谢。

由于编者水平有限,在编写过程中难免存在错误和不足之处,敬请读者指正。

编 者

2010 年 3 月

目 录

绪 论	(1)
1 工程材料的分类及性能	(3)
1.1 工程材料的分类	(3)
1.2 材料的性能	(4)
2 金属的晶体结构	(11)
2.1 晶体结构基础知识	(11)
2.2 实际金属的晶体结构与晶体缺陷	(17)
3 纯金属的结晶	(21)
3.1 结晶的现象与规律	(21)
3.2 金属的同素异晶转变	(26)
4 合金的结构与相图	(28)
4.1 概 述	(28)
4.2 合金在固态下的相结构及性能	(28)
4.3 二元合金相图与结晶过程分析	(32)
4.4 铁碳合金相图	(43)
4.5 碳钢的成分及分类	(56)
5 金属材料的塑性变形	(58)
5.1 单晶体的塑性变形	(58)
5.2 多晶体的塑性变形	(61)
5.3 冷塑性变形对金属组织和性能的影响	(62)
5.4 冷变形金属在加热时的组织和性能的变化	(64)
5.5 金属的热塑性变形	(67)
6 钢的热处理	(69)
6.1 概 述	(69)
6.2 钢在加热时的转变	(70)
6.3 钢在冷却时的转变	(73)
6.4 钢的普通热处理工艺	(84)
6.5 钢的表面热处理工艺	(95)
6.6 钢的其他热处理简介	(103)
6.7 机械制造过程中的热处理	(107)
7 合 金 钢	(112)
7.1 概 述	(112)
7.2 合金结构钢	(117)
7.3 合金工具钢	(130)

7.4 特殊性能钢	(138)
8 铸 铁	(149)
8.1 概 述	(149)
8.2 灰 口 铸 铁	(153)
8.3 可 锻 铸 铁	(156)
8.4 球 墨 铸 铁	(158)
8.5 蠕 墨 铸 铁	(161)
8.6 合 金 铸 铁	(162)
9 有色金属及其合金	(164)
9.1 铝及铝合金	(164)
9.2 铜及铜合金	(173)
9.3 钛及钛合金	(178)
9.4 滑动轴承合金	(180)
10 非金属材料	(183)
10.1 高分子材料的基础知识	(183)
10.2 工程高分子材料	(187)
11 材料表面改性技术	(205)
11.1 热喷涂技术	(205)
11.2 高能束强化技术	(209)
11.3 气相沉积技术	(217)
12 机械零件材料的选用	(224)
12.1 材料选用的一般原则	(224)
12.2 选材的基本过程与失效分析	(226)
12.3 工程材料的应用	(228)
12.4 典型零件的选材及热处理工艺选择分析	(235)
附录	(250)
附录 1 机械零件常用钢材及热处理方法	(250)
附录 2 淬火钢回火温度与硬度的关系	(252)
附录 3 洛氏硬度 HRC、HRA 与其他硬度、强度换算关系表	(253)
附录 4 洛氏硬度 HRB、HRA 与其他硬度、强度换算关系表	(254)
参 考 文 献	(255)

绪 论

“工程材料”课程是研究与材料有关的成分、工艺、组织和性能相互之间关系的一门技术基础课,是机械类各专业的必修课。

材料的发展一直是社会进步的物质基础和先导。人类社会的发展史证明,生产中使用的材料的性质直接反映了人类社会的文化水平。所以,历史学家根据制造生产工具的材料将人类生活的时代划分为石器时代、青铜器时代、铁器时代。

大约两三百万年前人类在地球上出现之后,最先使用的工具是石头。由古猿向原始人的漫长进化过程中,石器一直是主要的工具。在六七千年以前的原始社会末期,我们的祖先开始用火烧制陶器。到东汉出现了瓷器,并于9世纪传至非洲东部和阿拉伯,13世纪传至日本,15世纪传至欧洲。瓷器成了中国文化的象征。

人类在烧制陶器的过程中又发明了冶铜术。春秋战国时期《周礼·考工记》中关于青铜“六齐”的科学论述,反映我们的祖先已经认识到了青铜的成分和性能之间的关系。他们在铜材料的冶炼和使用方面达到了当时世界的高峰,创造了灿烂的青铜文化。我国青铜的冶炼在夏(公元前2140~前1711年)以前就开始了,到殷、西周时期已发展到较高的水平,普遍用于制造各种工具、器皿、兵器。如河南安阳晚商遗址出土的司母戊鼎重达875kg,外形尺寸为133cm×78cm×110cm,是迄今世界上最古老的大型青铜器;湖北江陵楚墓中发掘的两把越王勾践的宝剑,长55.6cm,至今仍然异常锋利;湖北隋县出土的战国青铜编钟等都是我国古代文化艺术高度发达的佐证。

由青铜器过渡到铁器是生产工具的重大发展。我国是最早进行生铁冶炼的国家,溯至春秋战国时期(公元前770~前475年)就开始大量使用铁器。兴隆战国铁器遗址中发掘了浇铸农具用的铁模,说明冶铸技术已由泥砂造型进入铁模铸造的高级阶段。到西汉时期,炼铁技术又有了很大的提高。在河南巩县发掘出占地面积约120000m²的汉代冶铁遗址,残留20多座冶铁炉和锻炉,炉型庞大,结构复杂,并有鼓风装置和铸造坑,可见当时生产规模之宏大壮观。在长期的生产实践中,我国古代劳动人民还创造了享誉世界的三种炼钢方法。不仅如此,在材料的创造和使用上也有理论上的研究和总结,有西汉司马迁所著的《史记·天官书》中的“水与火合为淬”,东汉班固所著的《汉书·王褒传》中的“……巧冶铸干将之朴、清水淬其锋”,也有明代科学家宋应星著的《天工开物》一书等。历史充分说明,我国劳动人民在材料的创造和使用上有过辉煌的成就,为人类的文明进步作出了巨大贡献。

进入18世纪以后,由于工业迅速发展,对材料特别是钢铁的需求急剧增长,因此对材料的研究也进入了一个崭新的层次,在化学、物理、材料力学等学科的基础上,产生了一门新的科学——金属学。其主要任务在于探讨金属的组织 and 性能之间的关系。100多年以来,随着显微镜、X射线技术、电子显微镜以及电子探针、离子探针、俄歇电子谱仪等新仪器和新技术的相继出现和发展,人们对材料以及材料科学有了全新的认识。

可以这样说,20世纪以来,材料、能源与信息作为现代技术的三大支柱发展格外迅猛。在材料科学中,非金属材料的发展尤其神速,工程结构已不再单纯使用金属材料了。近年来,金

属与非金属相互渗透,并且相互结合,组成一个完整的材料体系。材料科学也就在金属学、高分子科学和陶瓷学等的基础上很快地发展起来了,其任务也是揭示材料的成分、结构和性能之间的关系。

材料科学的进展促进了国民经济和现代科学技术的发展,而国民经济和现代科学技术的进步又为新材料的发展提供了方向和技术。新材料是知识密集、技术密集、资金密集的一类新兴产业,是多学科相互交叉、相互渗透的科技成果,它们是诸多学科研究的最高成就。由于现代物理化学等基础科学的深入,为新材料的研制提供了许多新的原理与概念,并出现了一些新的特点:(1)在材料的微观结构设计方面,将从显微构造层次(约 $1\mu\text{m}$)向分子、原子层次($1\sim 10\text{nm}$)及电子层次($0.1\sim 1\text{nm}$)发展(微米、纳米材料);(2)将有机、无机和金属三大类材料在原子、分子水平上混合而构成所谓“杂化”(hybird)材料的构思设想,探索合成材料新途径;(3)新材料的研制,将在数据库和知识库的基础上,利用计算机对新材料的微观结构和性能以及它们之间的关系进行模拟;(4)选定重点目标,组织多学科力量联合设计某种新材料。

可以预见,21 世纪材料科学必将在当代科学技术迅猛发展的基础上朝着高功能化、超高性能化、复杂化(复合化和杂化)和智能化的方向发展,从而为人类社会的物质文明建设作出更大的贡献。

机械工程材料是材料科学的实用部分,学习本课程的目的是:使学生获得有关工程材料的基本理论和基本知识,并初步了解材料分析的基本方法;了解常用工程材料的成分、工艺、组织和性能之间的关系;具有根据机械零件的工作条件和性能要求合理地选用机械工程材料的初步能力。

1 工程材料的分类及性能

1.1 工程材料的分类

工程材料品种繁多,分类的方法各异,人们习惯上常把材料分为金属材料、非金属材料和复合材料。

目前机械工业发展速度很快,产品不断更新换代,这就带动了工程材料的迅猛发展,新材料、新技术不断涌现。如何正确选择材料和合理使用材料,尤其是掌握各种材料的加工工艺,充分发挥其本身的潜力,获得理想的使用性能,降低成本,提高产品质量,正是我们应着力研究的课题。在实际生产活动中,往往由于选材不当或者工艺不妥造成使用性能达不到要求,进而造成资源的浪费。因此,一个合格的机械工程技术人员必须具备有关材料方面的基础知识。

在机械工程中,金属材料是主体。之所以如此,是因为金属材料有很多优良的性能,如机械性能、物理性能、化学性能及工艺性能。更重要的是,通过变形或热处理可以改变其组织和性能,从而进一步发挥材料的潜在功能,扩大其使用性能。

近年来,非金属材料发展也很迅猛,尤其是人工合成高分子材料发展更是迅速,如工程塑料已成为一种新兴的工程材料。

此外,无机非金属材料,如高强度陶瓷、高温陶瓷、高韧性陶瓷、耐酸陶瓷等,也在国民经济中占有相当重要的地位。

金属材料可分为两大类,即黑色金属和有色金属,在工业生产中占主导地位,它具有良好的使用性能和工艺性能。这里不多叙述,着重介绍一下非金属材料。

非金属材料是指除金属材料以外的一切材料的总称,包括塑料、橡胶、陶瓷和复合材料等。非金属材料具有很多特异的性能,如塑料的质量轻、易成型、耐磨、隔热、隔音、绝缘,橡胶的高弹性,陶瓷的高硬度、耐高温、耐腐蚀等。另外,它们的原料来源广泛,自然资源丰富,成型工艺简单,因而得到广泛应用。

塑料是一种以合成树脂为主要成分的高分子有机化合物,其原料主要来自石油及其副产品。塑料可分为热塑性塑料和热固性塑料两大类。热塑性塑料的合成树脂的分子链具有线型结构,柔顺性好,经加热后软化并熔融成为流动的黏稠液体,冷却后即成型固化。这类塑料的优点是成型加工简单,具有较高的机械性能;缺点是耐热性和刚性较差。如聚乙烯、聚氯乙烯、聚酰胺(尼龙)、聚砜热塑性塑料。热固性塑料在受热后软化,冷却后成型固化,不可重熔,具有耐热性高、受压不易变形等特点,但机械性能不好。如酚醛、环氧、氨基塑料等属于热固性塑料。

塑料的成型加工简单,有注射成型、挤出成型、吹塑成型和压制成型四种。

橡胶是一种天然的或人工合成的高聚物的弹性体。天然橡胶是从天然植物中采集到的一种以聚异戊二烯为主要成分的高聚物。合成橡胶是用人工的方法将低分子物质经合成反应而制成,通常比天然橡胶性能更好。

陶瓷是一种无机非金属材料,分为普通陶瓷和特种陶瓷两大类。普通陶瓷是以黏土、长石和石英等天然原料经过粉碎、成型和烧结而成,主要用于日常生活、建筑及工业上的低压电器、高压电器、耐酸、过滤器皿等。特种陶瓷是以人工化合物(如氧化物、氮化物、碳化物、硅化物、硼化物及氟化物等)为原料制成的。陶瓷的特点是耐高温、硬度高、抗压强度高、抗氧化、耐磨损和耐腐蚀,但脆性大,不能受冲击,抗急冷急热性差,易碎裂。常用的工业陶瓷有普通陶瓷、氧化铝陶瓷、氮化硅陶瓷和氮化硼陶瓷。

复合材料是由两种或两种以上不同化学性质或不同组织结构的材料经人工组合而成的合成材料。它具有多相结构,其中一类组成物(或相)为基体,起粘结作用;另一类组成物为增强相,起提高强度或韧性的作用。如混凝土是由水泥、砂、石子组成的复合材料;轮胎是纤维和橡胶的复合体等。复合材料的每一组成部分不仅保持各自的性能特点,还能扬长避短,发挥叠加效应,进而取得多种优良的性能,这是任何单一材料无法比拟的。复合材料与传统材料相比有以下性能特点:

- (1)比强度和比模量大(比强度和比模量是指材料的强度、模量与相对密度之比)。
- (2)抗疲劳性能好。
- (3)减振性能好。
- (4)耐高温性能好。
- (5)断裂安全性好。

常用的复合材料有玻璃纤维复合材料和碳纤维复合材料(玻璃钢)。其中玻璃纤维复合材料分为热塑性玻璃钢和热固性玻璃钢。如尼龙、聚烯烃类、聚苯乙烯类为热塑性玻璃钢;酚醛树脂、环氧树脂等为热固性玻璃钢。

1.2 材料的性能

用来制造机器零件的材料应具有优良的使用性能和工艺性能。使用性能包括力学性能、物理性能和化学性能,而工艺性能是指对材料进行加工时应具备的与加工工艺相适应的性能。

1.2.1 力学性能

力学性能是指材料在力的作用下抵抗变形和开裂的性能。常用的力学性能指标有弹性、塑性、冲击韧性、强度、硬度和疲劳强度等。

1.2.1.1 弹性、塑性和强度

1. 拉伸试验

拉伸试验是测定静态机械性能指标的常用方法。将被测材料做成一定直径的拉伸试样,并取一定长度做标记,称为标距 l_0 。试验时,试样两端被钳口夹住缓慢拉长,直至试样被拉断。在整个试验过程中,试验机自动记录每一瞬间作用在试样上的力 F 与试样伸长量 Δl ,并绘出两者的关系曲线,如图1.1所示。拉伸图上的载荷 F 与绝对伸长量 Δl 不仅与试验的材料有关,还与试样的尺寸有关。为了消除试样尺寸的影响,用试样原始横截面积 S 去除拉力 F 得到试样所受的拉应力 σ ,而以试样的原始长度 l_0 去除绝对伸长量 Δl 得到试样的相对伸长(应变) ϵ ,以 σ 与 ϵ 为坐标的关系曲线叫做应力-应变曲线。见图1.2。

这里提到应力的概念,是因为强度指标的数值都是以应力表示的。材料受外力作用时,在

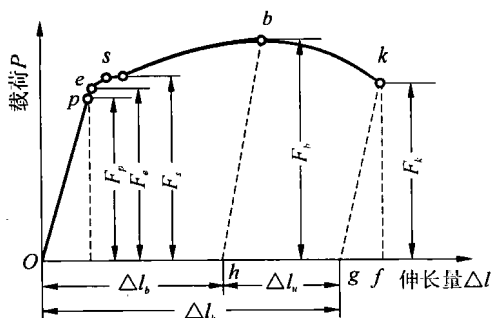


图 1.1 退火低碳钢拉伸图

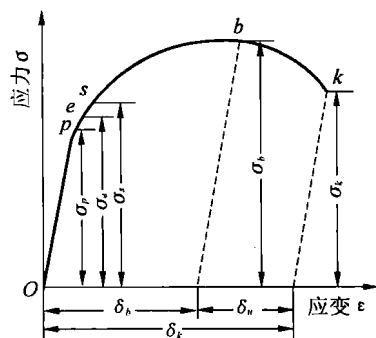


图 1.2 应力-应变曲线

其内部相应产生的与外力相平衡的抵抗力称为内力,在单位面积上产生的内力称为应力。如图 1.3 所示的受拉件,在其正截面上分布着内力。假定这内力是均匀分布的,则应力为

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (\text{Pa})$$

式中 F ——外力(N);

S ——受力截面积(m^2)。

应力的单位是 Pa(帕),工程上常用 MPa(兆帕), $1\text{MPa}=10^6\text{Pa}$,或 $1\text{MPa}=1\text{N}/\text{mm}^2$ 。

2. 弹性

在图 1.1 中,曲线一开始是直线,也就是说拉力与变形成正比。如果撤除拉力,试样将恢复到原始长度。这种随载荷撤除而消失的变形就是弹性变形。图 1.2 中 e 点是弹性变形的最大极限,以该点的应力值 σ_e 作为弹性指标,称为弹性极限。

$$\sigma_e = \frac{F_e}{S_0} \quad (\text{MPa})$$

式中 F_e ——弹性极限载荷(N);

S_0 ——试样的原始横截面积(mm^2)。

一般零件在使用时均处于弹性状态。对于在工作条件下不允许产生塑性变形的零件,设计时弹性极限是选材的重要依据。

3. 塑性

塑性是指材料在载荷作用下产生塑性变形而不被破坏的能力。塑性指标通常用伸长率(延伸率)和断面收缩率来表示。

(1) 伸长率

伸长率是指试样拉断后的标距伸长量与原始标距之比。

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \times 100\%$$

式中 l_k ——试样断裂后的标距长度(mm);

l_0 ——试样原始的标距长度(mm)。

必须指出,由于试样的总伸长量包括均匀伸长与产生局部颈缩后的伸长,故 δ 值的大小同试样的长度与直径之比(国家标准规定有 5 倍和 10 倍两种,分别用 δ_5 和 δ 表示)有关,在比较不同材料伸长率时,要注意用同一长径比的试样。

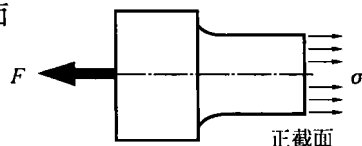


图 1.3 拉应力示意图

(2)断面收缩率

断面收缩率是指试样拉断处横截面积的收缩量与原始横截面积之比。

$$\psi = \frac{S_0 - S_K}{S_0} \times 100\%$$

式中 S_0 ——试样的原始横截面积(mm^2);

S_K ——试样断口处的横截面积(mm^2)。

断面收缩率与试样尺寸无关,所以它能比较可靠地代表材料的塑性。

塑性指标同样有着十分重要的意义。一方面,塑性好的材料可以进行各种压力加工,如锻造、拉拔、冲压、挤压等工艺;另一方面,在零件万一超载时,材料产生塑性变形并伴随形变强化而不至于立刻断裂。

4. 强度

强度是材料在载荷作用下抵抗变形和破坏的能力。根据受力状态的不同,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。在工程上抗拉强度最常用。用拉伸试验可测出屈服强度和抗拉强度。

(1)屈服强度(屈服点)

拉伸曲线中载荷达到 s 点时,材料产生屈服现象, s 点的应力值 σ_s 作为屈服的指标,称为屈服点,又称屈服强度。

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

式中 F_s ——试样屈服时的载荷(N);

S_0 ——试样的原始横截面积(mm^2)。

考虑到有不少材料在拉伸试验时看不到明显的屈服现象,为了确定它们的屈服指标,工程上规定以引起试样产生一定量的残余塑性变形时的应力作为条件屈服强度。规定的塑性变形量为 0.2%,即 $\frac{\Delta l'}{l_0} = 0.2\%$,相应的屈服强度用 $\sigma_{0.2}$ 表示。

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

式中 $F_{0.2}$ ——试样产生 0.2%残余塑性变形时的载荷(N)。

屈服强度是代表材料抵抗微量塑性变形的能力。当材料所受应力低于屈服强度时,仅有微量塑性变形产生;超过屈服强度时,将产生明显塑性变形。由于大部分零件和结构都要求在弹性状态下工作,不允许有过量的塑性变形出现,常以塑性变形的开始作为材料失效的标志,因此,屈服强度是确定材料许用应力的一个重要依据,也是统计和选材时的主要依据。

(2)抗拉强度

抗拉强度是指试样在断裂前所能承受的最大应力,用 σ_b 表示。

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

式中 F_b ——试样断裂前的最大载荷(N)。

塑性材料在达到 σ_b 时已产生了大量的塑性变形,这种情况在实际使用时是不允许的。因此,在设计和选用材料中不宜用 σ_b 作为直接的计算依据。然而,由于其他塑性较

差的材料在拉伸试验中往往没有明显的屈服现象,而 σ_b 比较容易测定,并且 σ_b 与其他性能(如硬度、疲劳强度)等存在一定的关系,因此, σ_b 仍作为衡量材料强度的一个重要指标。

1.2.1.2 硬度

硬度是指材料抵抗其他更硬物体压入其表面的能力,也可以看做是材料对局部塑性变形的抗力。一般来说,硬度越高,耐磨性越好,强度也越高。测定硬度的方法很多,常用的有布氏硬度测试法、洛氏硬度测试法和维氏硬度测试法等。

1. 布氏硬度

(1)测试方法和结果

在布氏硬度计上,将直径为 D 的淬硬钢球或硬质合金球在规定的载荷 F 的作用下压入被测材料表面,保持一定时间后将压力去除,然后测量被测金属的凹痕直径 d (图 1.4)。压痕单位面积上所承受的平均压力($\frac{F}{S_{\text{压痕}}}$)即为布氏硬度值,用符号 HBS 或 HBW 表示(压头为钢球时用 HBS,压头为硬质合金球时用 HBW)。

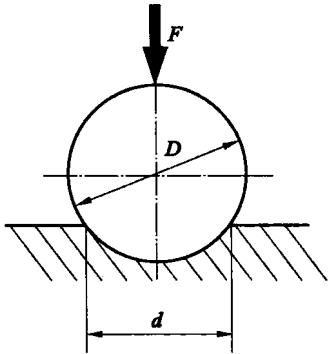


图 1.4 布氏硬度试验原理图

$$HBS(HBW) = \frac{F}{S_{\text{压痕}}} = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

布氏硬度的单位为 kgf/mm^2 ,一般不标出(在硬度测试规范中,力的单位仍可用 kgf 。如果以 N 作单位,则计算公式中还需乘以系数 0.102)。

表达布氏硬度值的字符包括数值、硬度符号和试验条件。例如,当用 10mm 钢球在 1000kgf 载荷作用下,保压 30s 测得的布氏硬度值为 250 时,可写成 250HBS10/1000/30;再如,550HBW5/750 表示用 5mm 硬质合金球在 750kgf 载荷作用下,保持 10~15s(可省略标注),测得的布氏硬度值为 550。

(2)特点和应用范围

用布氏硬度测量所得的硬度值比较准确、稳定。但采用淬硬钢球压头时,只能测定硬度不太高的材料($<450\text{HBS}$),否则钢球本身会产生变形而影响试验结果的准确性。压头为硬质合金球时,适用于测量 450~650HBW 的材料。此外,由于布氏硬度试验压痕较大,不宜在成品上进行试验,也不适用于薄片或面积窄长的零件。

材料的硬度值与抗拉强度有一定的内在联系,强度越高,塑性变形抗力越大,硬度值也就越高,所以根据材料的硬度值可大致地估计出材料的抗拉强度。下列经验公式可供参考:

低碳钢($<175\text{HBS}$)	$\sigma_b \approx 0.36\text{HBS}(\text{MPa})$
高碳钢($>175\text{HBS}$)	$\sigma_b \approx 0.34\text{HBS}(\text{MPa})$
灰口铸铁	$\sigma_b \approx \text{HBS}(\text{MPa})$

2. 洛氏硬度

(1)测试方法与结果

在洛氏硬度计上,将顶角为 120° 的金刚石圆锥体或直径为 1.588mm 的淬硬钢球压头在一定载荷 F 的作用下压入被测材料表面,然后根据压痕的深度来衡量洛氏硬度值(图 1.5)。

为了消除被测材料表面质量对测量结果的影响,压力 F 分初载荷和主载荷先后施加。洛氏硬度以每 0.002mm 压痕深度为一硬度单位,用符号 HR 表示。

$$HR = \frac{K - (h_1 - h_0)}{0.002}$$

式中 h_0 ——在初载荷作用下压头压入的深度(mm);
 h_1 ——加初、主载荷随后撤除主载荷时的压痕深度(mm);
 K ——常数,采用钢球压头时取 0.26,采用金刚石圆锥体压头时取 0.2。

图 1.5 中 h_1 是主载荷撤除、经弹性恢复后的压痕深度。深度越大,HR 值越小,表示材料的硬度越低;反之则表示材料的硬度较高。测量洛氏硬度时不必计算,当主载荷撤除后,便可直接在洛氏硬度试验计的刻度盘上读出硬度值。根据外载荷和压头的不同,洛氏硬度值有三种标尺,分别用符号 HRA、HRB、HRC 来表示,见表 1.1。表达洛氏硬度值的字符由洛氏硬度符号和数字组成,如 HRC58~62,HRB80。

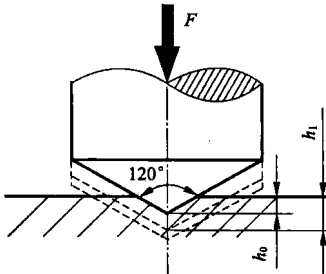


图 1.5 洛氏硬度试验原理图

表 1.1 洛氏硬度试验规范

硬度符号	压头类型	总载荷(初载荷+主载荷)(N)	常用硬度值范围
HRA	120°金刚石圆锥体	588(98+490)	70~85
HRB	直径为 1.588mm 淬硬钢球	980(98+882)	25~100
HRC	120°金刚石圆锥体	1470(98+1372)	20~67

(2)特点及应用范围

与布氏硬度法相比,洛氏硬度的测试过程简单、迅速,适应的硬度范围广,压痕小,但精确度不如布氏硬度的测量结果。测量时,为消除因材料不平或组织不均匀的影响,除了上述分初载荷和主载荷加载外,还需取数个测量点测出其硬度值的平均值作为测试结果。

3. 维氏硬度

维氏硬度的试验原理与布氏硬度基本相同,它是将顶角为 136°的四棱锥金刚石在较小压力 F 作用下压入被测材料表面,并按规定保持一定时间,然后用附在试验计上的显微镜测量压痕的对角线长度 d (图 1.6),以凹痕单位面积上所承受的压力为维氏硬度值,用符号 HV 表示。

$$HV = \frac{F}{S_{\text{压痕}}} \approx 1.8544 \frac{F}{d^2}$$

表达维氏硬度值的字符与布氏硬度相似,如 500HV30/20 依次为数字、硬度符号、压力大小(kgf)和压力保持时间(s)(如果保压时间为 10~15s 时可省略标注,如 640HV50)。

在各种硬度值之间不能直接比较,也没有公式换算,需要换算时可以查各种硬度的对照表(这里不列出)。当硬度值在一定范围内时,也可以用下面的近似公式换算:

$$HRC \approx 10HBS \quad (\text{当 HBS 数值为 } 200 \sim 600 \text{ 时})$$

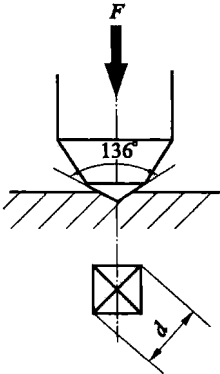


图 1.6 维氏硬度试验原理图

$$HV \approx HBS \quad (\text{当 } HBS \text{ 数值小于 } 400 \text{ 时})$$

1.2.1.3 冲击韧性

许多机器零件在工作过程中往往受到冲击荷载的作用,如内燃机的连杆和活塞销、齿轮的齿等。由于冲击荷载的加载速度快,作用时间短,使金属在受冲击时应力的分布和变形很不均匀。为此,在设计承受荷载作用的机器零件时,必须考虑它的冲击韧性。

冲击韧性是指材料在冲击荷载作用下抵抗破坏的能力。冲击韧性值就是试样缺口处单位截面上所消耗的冲击功。试验时,将制成带有 V 形(或 U 形)缺口的试样,在试验机上由置于一定高度的重锤自由落下而一次冲断,如图 1.7 所示。

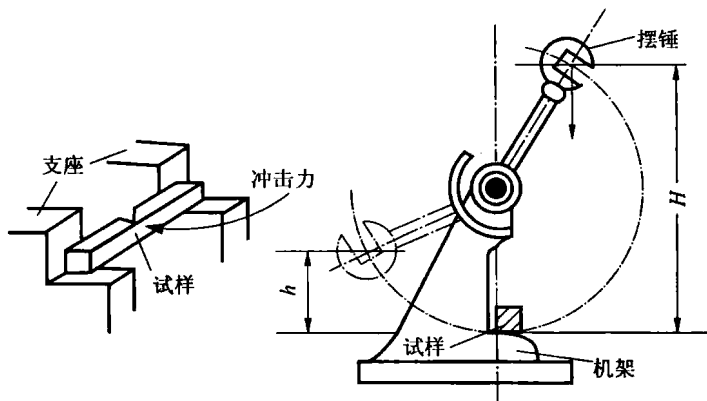


图 1.7 冲击试验原理图

冲击韧性值 a_{KV} (或 a_{KU}) 可表示为:

$$a_{KV} = \frac{A_{KV}}{S_0} \quad (\text{J/cm}^2)$$

$$a_{KU} = \frac{A_{KU}}{S_0} \quad (\text{J/cm}^2)$$

式中 S_0 ——试样缺口处横截面积(cm^2);

A_{KV} ——V 形缺口试样冲断时所消耗的冲击功(J);

A_{KU} ——U 形缺口试样冲断时所消耗的冲击功(J)。

冲击韧性值受试验温度、试样形状、表面粗糙度、内部组织等因素的影响而有所变化,故通常不直接用于设计计算。此外,生产中遇到许多承受冲击荷载的零件或工具,并不是由于一次超载冲击而导致损坏的,而是经过小能量多次重复冲击才逐渐损坏的。尽管如此,但本试验方法方便、迅速,能灵敏地反映材料的脆性趋势及材料的冶金、切削加工、热处理等方面的质量问题,所以目前在生产和科研中仍得到广泛应用。

1.2.1.4 疲劳强度

疲劳强度是表示材料经无数次交变荷载作用而不致引起断裂的最大应力值。用光滑试样作弯曲疲劳试验(见图 1.8,试样表面的应力是抗压对称交变的),测出的材料所承受的交变应力 σ 与断裂前的应力循环次数 N 之间有着图 1.9 所示的关系。

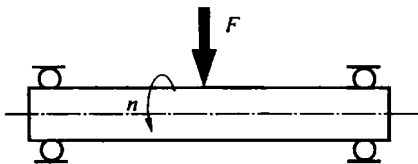


图 1.8 弯曲疲劳试验原理图

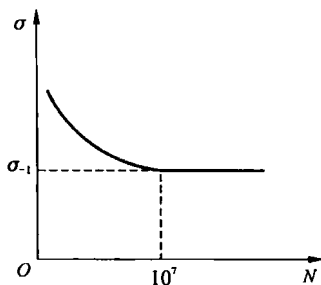


图 1.9 疲劳曲线示意图

由图 1.9 可知,当 \$\sigma\$ 降低到一定值时,曲线与横轴近于平行,这一应力值表示材料可经受无数次应力循环而不被破坏,它就是材料的疲劳强度。图中以 \$\sigma_{-1}\$ 表示试样的对称弯曲疲劳强度。

实际试验时不可能进行无数次的应力循环。对于钢材,一般取循环次数 \$N=10^7\$;对有色金属,取 \$N=10^8\$ 为基数来确定疲劳强度,称为条件疲劳强度。

材料发生疲劳破坏的原因很多,如材料的内部缺陷和在加工中形成的磨痕、刀痕以及零件结构设计不当等因素,使零件在受载时局部造成应力集中而导致微观裂纹产生,结果在交变应力的反复作用下,微裂纹扩展,使材料有效截面积减小而出现突然断裂。

为了提高材料的疲劳强度,首先应减少应力集中,其次是进行表面强化处理,使表层存在压应力,以抵消零件工作时所承受的一部分拉应力。

有关试验结果表明,钢材的疲劳强度与其抗拉强度之间有如下关系:

$$\sigma_{-1} \approx (0.45 \sim 0.55)\sigma_b$$

1.2.2 材料的其他性能

1. 物理性能

金属材料的物理性能包括密度、熔点、导电性、导热性、热膨胀性和磁性等。工程材料的这些性能决定了它们的适用范围。

2. 化学性能

化学性能主要是指耐腐蚀性和抗氧化性等,如医疗器械要求严格的防腐蚀性。有的制件需要在酸、碱等腐蚀性介质中或在高温下工作,又要求材料具有良好的化学稳定性。如不锈钢具有耐腐蚀性和抗氧化性,耐热钢可在高温下工作等。

3. 工艺性能

工艺性能是指材料对于零件制造工艺的适应性,包括铸造性能、锻造性能、焊接性能、切削加工性能和热处理性能等。

金属材料的工艺性能实际上是物理、化学和机械性能综合的结果,如铸造性能涉及熔点收缩性和凝固前的流动性等,锻造性能涉及塑性、强度和抗氧化性等,而切削加工性能则与强度、硬度、塑性、导热性等有关。各种材料因其不同的工艺性能而适用于不同的加工方法,如铸铁具有良好的铸造工艺性能和切削加工性能,但锻造性能和焊接性能很差。

2 金属的晶体结构

2.1 晶体结构基础知识

2.1.1 晶体的基本概念

2.1.1.1 晶体

自然界中除少数物质(如普通玻璃、松香、赛璐珞等)外,包括金属在内的绝大多数固体都是晶体。天然晶体一般具有规则的几何外形,例如食盐结晶呈立方体形,明矾结晶呈八面体形。然而金属制品都不具有规则的几何外形,可见晶体与非晶体的区别不在外形,主要在于内部原子排列方式。所谓晶体,是指原子(或分子)在三维空间按一定规律作周期性排列的固体。而所有的非晶体,其内部原子则是散乱分布着,至多有些局部的短程规则排列。

晶体与非晶体中原子排列方式不同导致它们在性能上表现出较大差异。首先,晶体具有一定的特点,非晶体则没有。在熔点之上,晶体变成液体,处于非结晶状态;在熔点以下,液体又变成晶体,处于结晶状态。熔点就是晶体物质的结晶状态和非结晶状态相互转变的临界温度。对于一定的晶体,其熔点是一个恒定值。固态非晶体则是液体在冷却时尚未来得及变成晶体就凝固了,所以它实质上是一种过冷的液体结构。其次,晶体的某些物理性能和力学性能在不同方向上具有不同的数值,即各向异性。而非晶体则是各向同性的。

2.1.1.2 空间点阵、晶格及晶胞

在实际晶体中,每个原子都围绕着自身的平衡位置不停地振动着,并且这种振动随着温度的升高而加剧。此外,晶体中还存在着局部破坏原子排列完整性的各种缺陷。为了讨论方便,这里先把晶体看成是由不动的原子所组成,而且是不含各种缺陷的理想晶体。

假定理想晶体中的原子都是固定不动的刚球,则晶体可被认为是由这些刚球堆砌而成。图 2.1(a)即为这种刚球堆砌模型。该模型的优点是立体感强,很直观;缺点是刚球密密麻麻地堆在一起,很难看清内部的排列规律,不便于研究。为了方便起见,常将构成晶体的实际质点(原子、离子、分子或原子集团)的体积忽略,抽象成为纯粹的几何点,称之为阵点或结点。这些阵点可以是原子或分子的中心,也可以是彼此等同的原子群或分子群的中心,但各个阵点的环境必须相同。这种由周围环境相同的阵点在空间排列的点阵称为空间点阵。进一步用许多平行直线将空间点阵的各阵点连接起来,构成一个三维空间格架,如图 2.1(b)所示。这种用以描述晶体中原子排列规律的空间格架就称为晶格。

由于晶体中原子排列具有周期性的特点,故可从晶格中选取一个能完全反映晶格特征的最小几何单元来分析晶体中原子排列的规律性,这个最小的几何单元称为晶胞,如图 2.1(c)所示。通常是取一个最小的平行六面体作为晶胞,将晶胞作三维的重复堆砌就构成了空间点阵。

2.1.1.3 晶系和布拉菲点阵

自然界中的晶体有成千上万种,它们的晶体结构各不相同,但根据空间点阵“每个阵点周