

全国高等农业院校教材

机械工程材料学

北京农业机械化学院主编

农业出版社

全国高等农业院校教材
机 械 工 程 材 料 学
北京农业机械化学院主编

* * *
责任编辑 何致莹

农业出版社出版 (北京朝内大街130号)
新华书店北京发行所发行 农业出版社印刷厂印刷

787×1092毫米16开本 12.5印张 290千字
1986年5月第1版 1986年5月北京第1次印刷
印数 1—3,900册

统一书号 15144·701 定价 2.20 元

前 言

本书是根据1983年全国高等农业院校《机械工程材料学》教学大纲审订会议纪要的精神,考虑到机械工程材料实际应用现状与发展,结合近年来的教学实践而编写的。

本书编写时主要注意了以下几个问题:①考虑到了1979年北京农业机械化学院主编《金属材料及热处理》一书中的一些可取之处;②尽量用近代观点解释材料中的若干问题,适当加强了基础理论中的某些章节;③考虑到专业需要特点,对部分章节的体系与内容作了必要的更改;④除介绍传统的金属材料外,注意到了新材料(金属材料与非金属材料)与新工艺的发展;⑤增设了第三篇,目的在于加强对机器零件失效分析与对材料合理选用的这一重要教学要求;⑥计量单位统一采用国际单位制(SI),并以国际代号表示,如强度指标单位一律用 MN/m^2 ,即兆·牛顿/米²($1\text{MN/m}^2 \approx 0.1\text{kgf/mm}^2$);冲击韧性指标单位采用 KJ/m^2 ,即千·焦耳/米²($1\text{KJ/m}^2 \approx 0.01\text{kg}\cdot\text{m/cm}^2$);硬度值仍沿用 kgf/mm^2 为单位,一般不予标注。

参加本教材的大纲与教材审订稿的有:浙江农业大学、华南农学院、西北农学院、青海工农学院、西南农学院、湖南农学院、黑龙江八一农垦大学、广西农学院、新疆八一农学院、河北农业大学、云南农业大学、福建农学院、沈阳农学院、内蒙古农牧学院和北京农业机械化学院。

本教材中绪论、第一、二章由北京农业机械化学院农绍华编写,第三、四、七、八、十章由北京农业机械化学院赵世纬编写,第五、十二章由西北农学院吴希绣编写,第六、九、十三章由青海工农学院徐集榆编写,第十一章由北京农业机械化学院李德玉编写。全书由赵世纬汇总统稿,由农绍华任主编。北京农业机械化学院胡三媛为全书的图稿整理作了许多具体工作。

由于我们水平有限,经验不足,难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

1984年8月于北京

目 录

前言

绪论	1
----------	---

第一篇 金属材料学基础理论

第一章 金属机械性能	3
第一节 拉伸图	3
第二节 弹性、刚度和弹性能	4
第三节 强度	5
第四节 塑性	6
第五节 硬度	7
第六节 疲劳强度	8
第七节 韧性(冲击韧性)	9
第八节 断裂韧性	10
第二章 金属的晶体结构和结晶	11
第一节 金属的概念	11
第二节 金属的晶体结构	12
第三节 金属的结晶	16
第四节 实际的晶体结构	19
第三章 合金	21
第一节 合金的结构	21
第二节 合金的结晶与二元合金状态图	29
第三节 铁碳合金状态图	37
第四章 金属塑性变形及强化	48
第一节 金属的塑性变形	49
第二节 变形金属在加热时组织与性能的变化	54
第三节 金属强度的实质与金属强化的概念	58
第五章 钢的热处理	61
第一节 钢在加热时的转变	62
第二节 钢在冷却时的转变	64
第三节 钢的退火与正火	73
第四节 钢的淬火	75
第五节 钢的淬透性	77
第六节 钢的回火	79
第七节 钢的表面热处理	83

第八节 提高钢的强韧性途径	89
第九节 零件结构的热处理工艺性	91
第十节 热处理工艺和其它加工工艺间的关系	92

第二篇 常用机械工程材料

第六章 结构钢	93
第一节 钢的概述	93
第二节 调质钢	97
第三节 表面硬化用钢	102
第四节 工程结构用钢	105
第五节 专用结构钢	107
第七章 工具钢	111
第一节 概述	111
第二节 刃具钢	112
第三节 高速钢	114
第四节 硬质合金	118
第五节 模具钢与量具钢	119
第八章 特殊性能钢	122
第一节 耐磨钢	122
第二节 不锈钢	122
第三节 耐热钢	124
第九章 铸铁	125
第一节 白口铁和灰口铁	125
第二节 可锻铸铁	130
第三节 球墨铸铁	131
第四节 特殊性能铸铁	134
第十章 其它金属材料	135
第一节 铝及铝合金	136
第二节 铜及铜合金	141
第三节 滑动轴承材料	144
第四节 有色金属合金模具材料	147
第十一章 非金属材料	149
第一节 高聚物的基本知识	149
第二节 常用塑料	153
第三节 合成橡胶	161
第四节 陶瓷	164
第五节 复合材料	168

第三篇 零件的失效分析与选材

第十二章 零件的失效	172
第一节 零件的失效形式	172

第二节	失效分析的一般方法.....	177
第三节	零件失效分析举例.....	178
第十三章	零件材料的选择.....	180
第一节	合理确定热处理技术条件.....	181
第二节	选择零件材料的原则.....	182
第三节	典型零件选材分析.....	186

绪 论

材料、能源和信息是发展现代社会生产的三大支柱，而材料则是其中的物质基础，因此，各国对材料科学的研究和发展非常重视。

从历史来看，社会的文明进步和生产技术的发展，总是和新材料的出现密切相关的。它既互为因果，又互相促进。由于科学技术的飞跃发展，对材料的要求也就愈来愈高。

现代材料，种类繁多，一般可分为金属材料、有机非金属材料 and 无机非金属材料及其复合材料等。按用途又可分为结构材料和功能材料。

《机械工程材料学》是研究与机械工程有关的材料的成分、结构、加工与性能之间关系的一门技术基础课。是一个工程技术人员所必须具备的基础知识。

金属材料由于具有许多优良的机械性能（强度、硬度、塑性和韧性等），物理、化学性能以及加工性能，又兼它的矿藏丰富，因而，它在国防工业、冶金工业、交通运输业、轻工业和农业机械等机械制造业中获得广泛的应用，成为机器制造中不可缺少的材料。

金属的应用在我国有着悠久的历史，早在公元前一千七百多年的殷商时代，铸铜技术已达到很高的水平。当时不仅掌握了铸铜的冶炼技术，而且还能根据不同的用途配制不同的铜锡合金，并总结了符合于现代金属学的理论文献，如《周礼考工》有如下的记载：“金（铜）有六齐，六分其金，而锡居其一，谓之钟鼎之齐；五分其金，而锡居其一，谓之斧斤之齐；四分其金，而锡居其一，谓之戈戟之齐；三分其金，而锡居其一，谓之大刃之齐；五分其金，而锡居其二，谓之削杀矢之齐；金锡半，谓之鉴燧之齐。在明朝宋应星所著《天工开物》中，关于淬火、退火以及渗碳等，则都有更详细的记载。

由上所述，我国古代劳动人民在热处理工艺技术方面，已发展到相当高的水平。然而近二三百年来，我国由于受封建主义和帝国主义的压迫，科学技术发展缓慢，造成解放前十分落后的状态。

建国以来，由于大力发展科学技术，我国钢铁工业及热处理技术方面，得到较快的发展。为了适应机器制造业的需要，钢铁生产已由 1949 年的年产量 15.8 万吨发展到 1983 年的 4002 万吨。并且根据我国的具体情况，制订并完善了钢铁的新标准；建立了符合我国资源的合金钢系统，新的钢种也日益在发展，有力地支援了祖国的社会主义建设。世界驰名的南京长江大桥，就是利用我国新创造出来的普通低合金高强度钢 16Mn 建造出来的。

在热处理技术方面，也有很大的发展和成就，许多新工艺、新技术、新材料不断地被应用于生产。如可控气氛热处理、真空热处理及新淬火剂的应用等，都得到了发展。特别是近年来，化学热处理方面的新工艺发展得更快，如软氮化、辉光离子氮化、碳—氮—硼三元及多元共渗等。新工艺、新技术的发展，更大地扩大了金属材料的使用范围。

随着科学技术的飞跃发展，非金属材料也得到迅速的发展，就塑料而言，据有关资料统计，1930 年世界塑料总产量为 10 万吨，1980 年已达到 6009 万吨。预计到 1985 年将达

到1亿吨左右。到2000年将达3.5亿吨,几乎每四、五年,产量就要翻一翻,且性能不断地提高,新的品种也不断地出现,应用已遍及国民经济的各个领域。这说明工程塑料将成为前景十分广阔的工程材料。

无机非金属材料中,作为结构材料的陶瓷,发展也很快,有高强度陶瓷、高温陶瓷、高韧性陶瓷、耐酸陶瓷等,在国防、化工、建筑等工业部门发挥了它独特的作用。

非金属材料,除在某些力学性能上目前尚不如金属材料外,它具有金属所不具备的许多性能及特点,如耐高温、耐腐蚀、绝缘、消声、减震、质轻、成型加工容易、生产率高和制造成本低廉等。所以,非金属不仅在生活用品上,而且在工业上的应用也已日益广泛。有些机器的金属零部件,已逐渐被非金属材料制品取代了,例如畜牧机械中挤奶器的某些零件,为了避免腐蚀,过去一直用不锈钢制造,不仅消耗了大量稀缺的铬、镍元素,而且成本高,现在用工程塑料代替,制造简单,成本也低;又如播种机上的排种器,过去用铸铁材料,即笨重,生产率又低,也不耐腐蚀,现在已改用工程塑料制造,既耐腐蚀又轻巧,成本也低。机器上的皮带轮,喷灌设备上的喷嘴等等,过去都是用铸铁或铝合金制造的,现在也用塑料制作了,尤其是自人工合成纤维材料问世以来,人们利用这些纤维来增强塑料,制成各种复合材料,如玻璃钢等,大大地提高了塑料制品的力学性能,从而扩大了其应用范围。

金属材料和非金属材料在性能上各有其优缺点,因而近年来人们正利用其各自的优点,取长补短,制成各种金属与非金属的复合材料制品,以满足工业上的需要。如轴套等。据有关资料报导,国内有的手扶拖拉机上目前已有三十多种零件采用工程塑料制造了。因而有人预言,二十一世纪将可能是一个复合材料的时代。

为了适应近代科学技术的发展,本书除介绍金属材料以外,还扼要介绍了高聚物的基础知识以及工程塑料、现代陶瓷、合成橡胶及复合材料的结构、性能和用途。

材料科学涉及的理论和内容非常广泛,不论哪一种材料,都有一个微观结构和性能的关系,尽管有它们各自的特点,但却具有相通的理论及共性。我们从选材的角度出发,必须抓住材料的各项性能指标,而这些性能取决于材料的微观组织结构。因此必须掌握材料的成分—加工工艺—组织—性能之间的关系及其变化规律;对材料的性能指标的物理本质、影响因素,以及强化机理,有较清晰的理解;初步掌握金相分析和零件失效分析,从而初步掌握选择材料和热处理工艺的基本知识。

本课程是和生产实际联系很密切的一门技术基础课,为了使学生对材料及热处理获得一定的感性知识,在课堂教学之前,学生须在热处理等车间进行认识实习。了解各种常用机械工程材料以及金属热处理工艺及常用设备。为了进一步培养学生分析问题和独立工作能力,除课堂教学外,尚须进行必要的实验和课堂讨论等,并尽可能采用电化教学,以提高教学效果。为此,我们同时出版有关实习、实验和课堂讨论指导书以及作业和思考题等辅助教材,以资配合。

第一篇 金属材料基础理论

第一章 金属机械性能

金属具有许多的优良性能，所以今天仍然获得广泛应用。金属的性能一般分为机械性能、物理、化学性能和工艺性能。

所谓机械性能，是指零件在外力作用下，材料所表现出来的力学行为，故又称力学性能，如强度、塑性、韧性和硬度等。

机械零件除在特殊条件下服役要求一定的物理、化学性能外，一般零件设计和选材，主要依据材料的机械性能，因此，本章主要介绍材料的机械性能。

第一节 拉伸图

金属材料在外力作用下，不同的材料所表现出来的性能不同，不同的外力（拉、压、扭、弯等）作用所表现出来的力学性能也不同，因此，必须进行各种实验测试。为了弄清金属在外力作用下的破坏规律，通常以拉伸试验为例。

拉伸试验是按 GB228-63 制作标准试样，在拉伸试验机上进行拉伸。随着轴向载荷（ P ）的增加，试件逐渐被拉长，直至被拉断为止。以外加载荷（ p ）和材料的伸长量（ ΔL ）为坐标，绘出 $P-\Delta L$ 间的关系曲线图形，叫拉伸图。图1—1为低碳钢的典型拉伸曲线。

拉伸图的外加载荷，是在缓慢的情况下加上去的，因此测得的各项性能指标，叫静强度指标。

从拉伸曲线可以看出：所加载荷大小不同，其变形情况就不同。金属材料发生变形的根本原因不在于外力，而在于金属的内部结构，外力只是发生变形的条件而已。如低碳钢这类塑性材料，在外力作用下，其破坏分为三个阶段，即：弹性变形阶段、塑性变形阶段和断裂。塑性材料在破断之前有明显的塑性变形，这种破断称为韧性断裂。

对于脆性材料，在破断之前无明显的塑性变形。这种破断称为脆性断裂。

显然，试件的拉伸图不仅与试件的材料有关，而且与试件横截面尺寸和标距的大小有关。所以不宜采用 $P-\Delta L$ 拉伸图表征材料的拉伸性能。

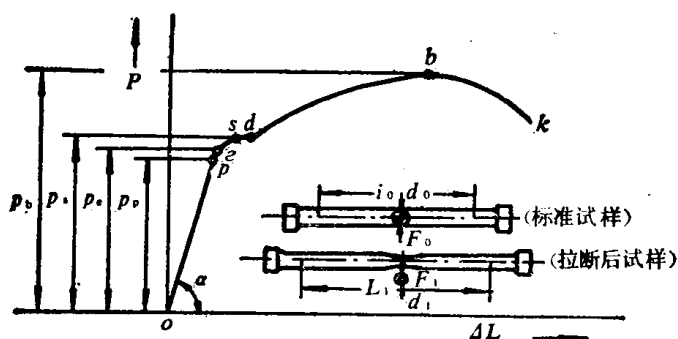


图 1—1 低碳钢的拉伸曲线

为了消除试件截面尺寸和试件试验段长度的影响,通常采用应力 ($\sigma = \frac{F}{F_0} \text{MN/m}^2$) 和应变 ($\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$) 来度量材料的变形程度。 $\sigma-\epsilon$ 曲线(即应力—应变曲线)和 $P-\Delta L$ 曲线相似,如图 1—2 所示。

下面根据应力—应变曲线并结合试验过程所发生的变形,介绍塑性材料各种性能的指标。

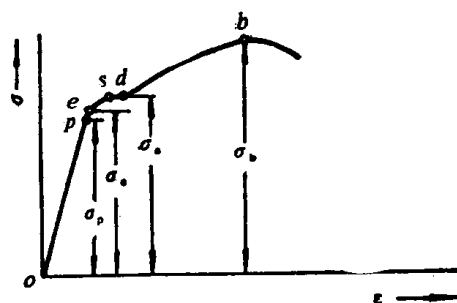


图 1—2 应力—应变图

第二节 弹性、刚度和弹性能

一、弹性

金属材料在外力作用下发生变形,当外力去掉后,材料恢复变形前的形状和大小,此种变形称为弹性变形。图 1—2 中, OP 为一直线,说明应力和应变成正比。因此, σ_p 称为比例极限 ($\sigma_p = \frac{P}{F_0} \text{MN/m}^2$)。而 oe 线段已不是直线,即应力与应变已不成正比例。

但去除外力后,材料仍然恢复原状,所以它的变形仍然是弹性变形。 σ_e 称为弹性极限

($\sigma_e = \frac{P_e}{F_0} \text{MN/m}^2$)。实际上, σ_p 与 σ_e 十分接近,可以看作相等。

因此,具有弹性变形特性的材料所能产生弹性变形而不产生永久变形的能力,称为弹性。

二、刚度

刚度是材料抵抗弹性变形的能力。材料在一定的的外力作用下,弹性变形大的,说明其刚度小,反之,其刚度则大。如上所述,在材料弹性变形阶段,应力 (σ) 与应变 (ϵ) 成正比,即

$$\sigma = E\epsilon$$

E 为比例常数,通常称为弹性模量。它表示引起单位应变所需的应力大小, E 值与材料的原子之间的作用力的强弱有关,但与合金化及热处理影响较小。工程上常用弹性模量 (E 值的大小) 作为衡量材料刚度的指标, E 愈大,刚度愈好。

零件的刚度,除与材料的弹性模量 E 值的大小有关外,还与零件的截面大小有关。

根据

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{\frac{P}{F}}{\frac{\Delta L}{L}}$$

$$\Delta L = \frac{PL}{EF}$$

式中 E ——弹性模量

ϵ ——轴向应变

P ——外载荷

ΔL ——轴向变形量

L ——零件长度

F ——零件横截面积

由上式可以看出：当 P 和 L 一定时，零件产生的弹性变形量决定于 E 和 F 的大小， E 、 F 值愈大，则 ΔL 愈小，即零件的刚度愈好。由此可知，为了提高零件的刚度，可以采取增加零件的横截面积或选取弹性模量较大的材料。

三、弹 性 能

弹性能是指金属材料吸收变形功而不发生永久变形的能力。它是衡量材料负载下吸收变形功大小的指标。图 1—3 中三角形面积大小即表示变形能量的大小。

由图可知

$$\text{弹性能} = \frac{1}{2} \sigma_e \epsilon = \frac{\sigma_e^2}{2E}$$

譬如弹簧是作为减震元件使用的，弹簧吸收变形能量的大小，除与弹簧的形状、表面状态有关外，还和材料的弹性极限和弹性模量有关。

由上式可知，为了提高材料的弹性能，就必须提高材料的 σ_e 。或降低其弹性模量，但降低 E 值的办法效果不显著，通常除了选择 σ_e 较高的材料（0.6—0.9% C 的碳钢）之外，往往采取加入合金元素的办法（在钢中加入 Si 和 Mn 等元素），以提高材料的 σ_e ，所以常见的弹簧钢材料有 65Mn、50SiMn 或 50SiMnV 等；或者用冷拔的办法，以提高其 σ_e ，所以一般小直径（ $\phi 2—7\text{mm}$ ）的小弹簧钢丝，往往是在冷拔状态下使用的；大直径的弹簧钢，则采取热处理的办法（淬火后中温回火），改善钢的组织，以提高其 σ_e ，就是这个道理。

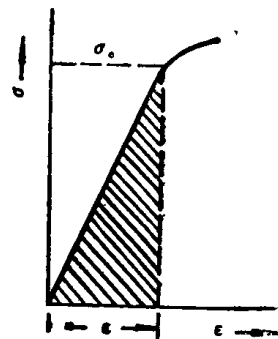


图 1—3 应力—应变图

第三节 强 度

强度就是金属抵抗外力而不破坏的能力。工程上所谓材料破坏，不仅仅是指材料破断为二。凡是零件受外力作用下产生的变形超过设计上所允许的限度，使零件不能正常工作时，都叫破坏。

零件承受拉力时，强度特性指标主要是屈服强度（ σ_s ）和抗拉强度（ σ_b ）。

一、屈服强度

在 $\sigma—\epsilon$ 图上，当应力达到 S 点时，图线出现水平（有微小波动）线段，在此阶段内，应力虽然没有增加，但试样变形仍自动增长，这种现象称为屈服。屈服时的应力，称为材料

的屈服应力，或称屈服极限，用 σ_s 表示。

$$\sigma_s = \frac{P_s}{F_0} \quad (\text{MN/m}^2)$$

式中 P_s ——材料屈服时的最小载荷 (MN)

F_0 ——试件原截面积 (m^2)

σ_s 是衡量材料微量塑性变形的指标。

对于某些较硬脆的金属材料，其屈服点很不易测定，工程上规定当材料受外力作用产生 0.2% 残余变形时的应力，作为该材料的屈服极限，以 $\sigma_{0.2}$ 表示，如图 1—4 所示。

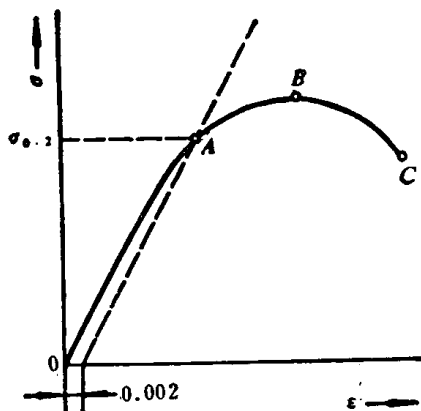


图 1—4 应力—应变图

二、抗拉强度

材料经过屈服之后，其变形抗力增大。要使材料继续变形，必须增大拉力，这种现象称为强化。当达到最高点 b 时的应力，称为强度极限，用 σ_b 表示。

$$\sigma_b = \frac{P_b}{F_0}$$

式中 P_b ——材料拉断前试件所承受的最大拉力 (MN)

F_0 ——试件原截面积 (m^2)

强度极限是作为零件因断裂而失效的设计依据。

材料的强度指标 (σ_s 、 σ_b) 与合金化，热处理和冷热加工关系极大。通过热处理是提高零件强度的必要手段。

第四节 塑性

金属材料在外力作用下，材料产生塑性变形而不破断的能力称为塑性。工程上常用延伸率 (δ) 和断面收缩率 (ψ) 作为材料塑性的指标。

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

$$\psi = \frac{F_0 - F_1}{F_0} \times 100\%$$

式中 L_1 ——试样拉断后的长度

L_0 ——试样原始长度

F_1 ——试样拉断处的横截面积

F_0 ——试样原始横截面积

δ 和 ψ 愈大，表示材料的塑性愈好。由于延伸率 (δ) 与试件的尺寸 (试件标距长度和直径) 有关。如图 1—5a、b，分别为试件在拉伸前与拉断后的示意图。试样在拉伸前标

距分为5个等分, 标记为a、b、c、d、e、f, 各部分的长度为1。试样拉断后, 原来a、b、c、d、e、f各点分别变为a'、b'、c'、d'、e'、f'。而a'b'、b'c'、c'd'、d'e'、e'f'各段发生了均匀拉长, 设其延伸率均为20%, c'd'延伸率达100%。若在试样选取的标距为b—c, 则延伸率 δ 为:

$$\delta = \frac{4.4 - 3}{3} \times 100\% = 46.7\%$$

若选取试样标距为a—f, 则其延伸率 δ 为:

$$\delta = \frac{6.8 - 5}{5} \times 100\% = 36\%$$

由此可见, 试样标距的长度不同, 其延伸率是不同的。因此, 试样必须作成统一的标准才能比较。一般用 $L_0 = 5d_0$ 或 $L_0 = 10d_0$ 的标准试样进行测试, 分别用 δ_5 或 δ_{10} 表示。同一材料所测得的 δ_5 一般比 δ_{10} 可能大20—50%, 因此, 对于不同材料只有用 δ_5 与 δ_5 比较或 δ_{10} 与 δ_{10} 比较才是正确的。

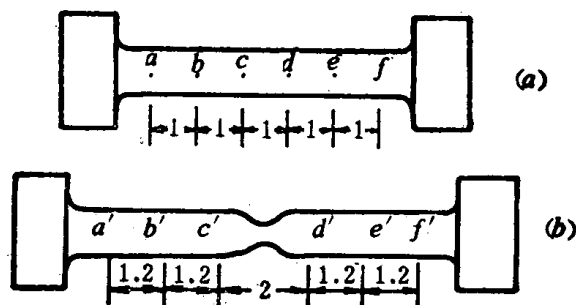


图 1—5 拉伸试样在拉伸前与拉伸后的示意图

第五节 硬 度

硬度一般在硬度试验机上测定。测定时, 把被测的工件置于比工件更硬的压头 (如金刚石锥体、淬火钢球等) 下, 加一定载荷, 使压头缓慢地压入工件表面, 使金属产生局部塑性变形而形成压痕, 然后根据压痕的深度或压痕单位面积承受压力的大小来计算其硬度值。实质上, 硬度是材料抵抗局部变形的能力。

金属材料抵抗塑性变形能力愈大, 其硬度值愈高。因此, 材料的硬度与强度之间存在一定内在联系。有时通过硬度的测定, 便可判断材料的强度。所以硬度测试已成为检验产品质量必不可少的手段。也是设计图纸上的技术参数之一。

常用的硬度指标有: 布氏硬度 (HB)、洛氏硬度 (HRC、HRB、HRA) 和维氏硬度 (HV) 等。

一、布氏硬度 (HB)

布氏硬度机所用的压头是淬火钢球, 不能作测试太硬的材料 (如淬火件等), 因材料太硬时, 钢球会变形, 测出的硬度不准确, 故一般只能测 $HB < 450$ 的材料。

淬火件常用洛氏硬度测定。

二、洛氏硬度 (HRC、HRB、HRA)

洛氏硬度因所用的压头及载荷不同又分为: HRC、HRB和HRA 三种, 各种所用的压头、载荷及其适用范围如表 1—1。

表 1—1 洛氏硬度各种压头、载荷及其应用

符 号	压 头	载 荷	适 用 范 围
HRC (RC)	120°金钢石锥体	150公斤	淬火、回火件、白口铸铁件等
HRB (RB)	淬火钢球 $\phi 1.59$ 毫米	100公斤	退火钢及有色金属等
HRA (RA)	120°金钢石锥体	60公斤	薄板或硬脆材料如硬质合金等

上列三种硬度，以 HRC 最为常用，但不宜用来测定硬而脆的薄层零件，如渗碳层、氮化层及氰化层等，因硬脆薄层容易被压头压穿，测得的硬度值不准，硬薄层工件常用维氏硬度测定之。

三、维氏硬度 (HV)

维氏硬度机压头是 136°金钢石四角锥体，所用载荷较小，一般从 5—30 公斤。根据工件硬化层的厚薄，可以任意选择载荷大小。

另外，还有一种叫做显微硬度，专门用来测试显微结构中的某一个相或某一组织的硬度（如软氮化层中的白亮层等），压头也是 136°金钢石四角锥体，载荷很小，只几克至几十克，若用 50 克载荷，则在 HV 的脚标下注上 50 数字，如 HV₅₀。

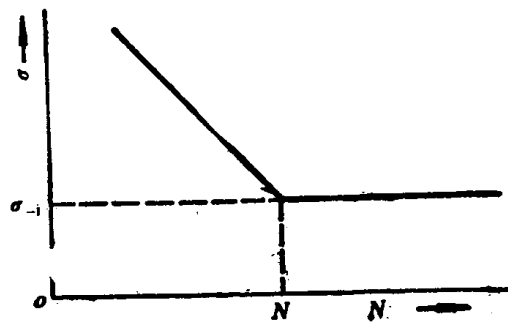
第六节 疲劳强度

从应力—应变图得知，在静载荷下，当金属材料承受小于该材料的抗拉强度 σ_b 时，材料不会破断。但当金属在小于 σ_b ，甚至小于 σ_s 应力之下经多次交变载荷作用时，金属会突然断裂，这种现象称为材料疲劳破断。因此，金属抵抗承受多次交变应力而不破断的能力，称为疲劳强度。通常以 σ_{-1} 表示。

实验表明：材料承受多次交变应力 (σ_{-1}) 与其循环次数 (N) 的关系如图 1—6 的曲线所示，称为疲劳曲线。

从曲线表明：材料承受的交变应力愈高，其断裂前所经受的循环次数 (N) 愈小，反之则大。若应力低于疲劳曲线的水平线时，虽经无数次的循环，材料亦不会产生疲劳断裂。通常，碳钢是以 $N = 10^7$ 时的最大应力值作为其疲劳极限。

金属疲劳断裂的原因，一般认为在多次循环交变应力作用之下，其应力值虽低于 σ_s ，但由于零件的表面状态或材料的内部结构不均匀及缺陷等，使局部地区应力集中，故首先在该区域产生塑性变形，造成微小裂纹，这种裂纹往往是由拉力所引起的。在应力继续作用下，裂纹不断扩大，零件的有效面积逐渐减小，以致最后承受不起外力的作用而突然破断。

图 1—6 疲劳曲线 ($\sigma-N$)

提高零件疲劳强度的途径是：在零件的过渡处须做成圆角以及提高零件的表面光洁度，此外，可用各种处理方法改善材料内部组织，使组织均匀，或对零件表面进行强化（如喷丸及各种化学热处理等），使表面造成残余压应力。这样可以抵消拉应力的影响而大大地提高零件的疲劳强度。

第七节 韧性 (冲击韧性)

冲击韧性是表示材料抵抗冲击载荷的能力。

测定材料的冲击韧性一般是在一次摆锤冲击试验机上进行（试样如图 1—7 所示）。测得试样在冲断时，断口单位面积所消耗的冲击功，称为冲击韧性或冲击值。冲击值常用 a_k 表示。即

$$a_k = \frac{A_k}{F} \quad (\text{KJ/m}^2)$$

式中 a_k —— 冲击值

A_k —— 冲断试样所消耗的冲击功 (KJ)

F —— 试样折断处的截面积 (m^2)

材料的 a_k 值愈大，说明其韧性愈好。

工程上长期以来采用 a_k 值作为衡量金属材料承受冲击载荷的抗力指标，因此，人们在考虑受冲击载荷零件的材料时，如各种齿轮及发动机的曲轴等，总是希望选取高的 a_k 值的材料制造。五十年代西安交通大学强度研究室的工作指出：

许多零件在工作中，即便受到冲击载荷，也不会遇到如此巨大的一次冲击载荷，而多半是受到小能量多次冲击，故其破断是由于小能量多次冲击使损伤积累，导致裂纹的发生和发展的结果。因此，提出了小能量多冲作为衡量有些零件承受冲击抗力的指标。

多次冲击试验采用连续冲击试机，一般为凸轮锤式，图 1—8 为多冲击试样及其工作位置示意图。

图 1—9 是用 35 号钢采取不同的热处理，获得不同强度和韧性的材料进行试验对比，

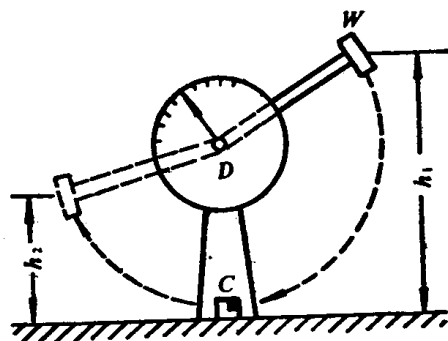


图 1—7 冲击试验机原理图

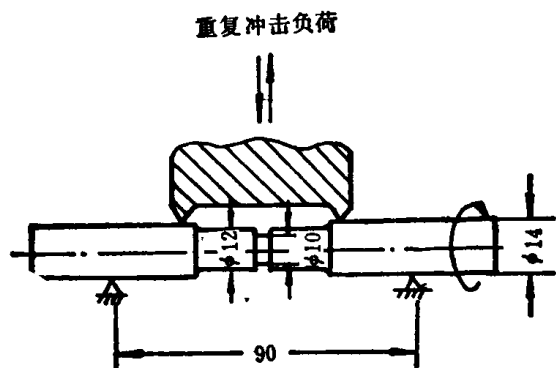


图 1—8 多次冲击试样及其工作位置示意图

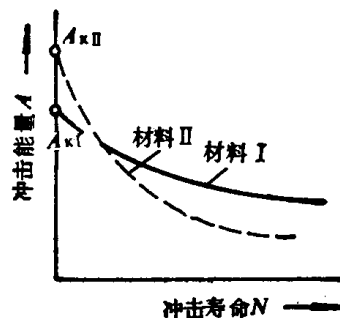


图 1—9 小能多冲疲劳曲线 ($A-N$ 曲线)

得到冲击能量 (A) 与冲击破断次数 (N) 的关系。由图中可以看出, 在两曲线交点上方, 高韧性低强度材料优越, 在交点下方, 高强度低韧性材料优越, 也就是说, 一次大能量冲击抗力主要取决于材料的塑性, 而多次小能量冲击抗力主要取决于强度, 从这个观点出发, 在设计一些承受冲击载荷的零件时, 片面地追求过高的 a_k 是没有必要的, 必须看工件具体情况分别对待。

小能多冲的试验研究, 在实际生产中已取得了良好的效果。例如, 锻锤杆是一个典型的承受小能量多次冲击的零件, 过去设计者片面地追求过高的 a_k 值, 因而使强度受到削弱, 故在使用中反而常常早期折断。后改用强度较高材料代替, 其冲击抗力大大提高, 使用寿命也成倍增长。球铁曲轴代替钢曲轴之所以成功, 就是这个道理。

第八节 断裂韧性

近几十年来, 由于大型焊接和高强钢的应用, 低应力脆断的事故不断发生, 如焊接铁桥发生突然断裂倒塌, 船舶的折断和高压容器的爆炸等, 因而引起了人们的注意。

低应力脆断, 是指零件在较低的应力状态下, 即低于材料的屈服强度, 而其材料本身的韧性和塑性又不低于传统的经验值下发生的脆断现象。

这种突然事故的发生, 是无法用传统的力学性能来解释的。人们对低应力脆断大量研究和分析发现, 材料脆断的原因, 是材料内部由于种种原因, 存在微裂纹, 在服役过程中, 裂纹扩展的结果, 是裂纹发生失稳扩展而引起的。因此, 裂纹扩展的难易, 便成为断裂力学中作为衡量材料是否容易脆断的一个重要指标。

研究表明, 材料低应力脆断与外加应力大小和裂纹的大小有关。

由于加载的方式不同, 裂纹扩展的方式可分为三种 (图 1—10)。图

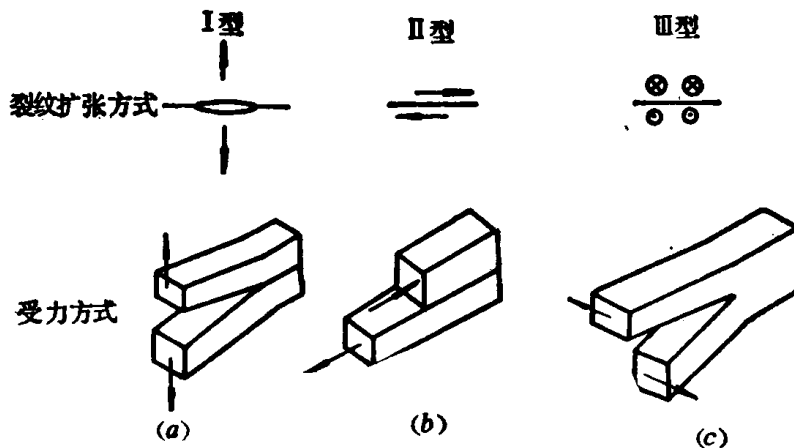


图 1—10 裂纹在不同外应力作用下的三种扩展方式

1—10a 为扩张型或称 I 型; 图 1—10b 为滑移型或称 II 型; 图 1—10c 为剪切型或称 III 型。其中以 I 型裂纹受力情况对裂纹扩展危害最大。所以这里主要讨论 I 型的情况。

实验表明, 裂纹在外加应力作用下, 裂纹尖端处存在较大的应力场。通过力学推导可知尖端处各向应力的大小, 除与该点的座标 (θ 、 r) 有关外, 还同参数 K (裂纹扩展的类型不同, 分别以 K_I 、 K_{II} 、 K_{III} 表示) 成正比, K 大, 则裂纹前沿各点的应力就大。 K 称为应力场强度因子。

张开型 (即 I 型) 应力强度因子与外加应力 (σ) 和裂纹长度 ($2a$) 的关系 (如图 1—11 所示) 为

$$K_I = y\sigma\sqrt{a}$$

式中 y ——裂纹形状、加载方式及试样类型有关的一个量

σ ——外加应力

a ——裂纹长度的一半

从上式可知，当外加应力或裂纹长度不断增大时， K_I 值也随之增大。当 K_I 值增大到某一数值时，裂纹就失去稳定而迅速扩展，材料处于临界脆断状态，此时的应力强度因子称为临界应力强度因子。用 K_{Ic} 表示，在断裂力学中 K_{Ic} 称为断裂韧性，它代表材料抗裂纹扩展的能力。

K_{Ic} 与传统力学的屈服强度相似，是材料本身的特性，它由材料的成分、组织所决定，与裂纹的尺寸、形状及外加应力大小无关。其大小可以通过实验测出。

当 $K_I > K_{Ic}$ 时，裂纹失稳扩展，发生脆性断裂；当 $K_I < K_{Ic}$ 时，裂纹不会扩展，不发生断裂；当 $K_I = K_{Ic}$ 时，材料处于临界脆断状态，所以 K_{Ic} 是衡量材料低应力脆断的指标。如果材料的 K_{Ic} 值愈高，即材料中允许存在的裂纹尺寸较大或可能承受的外加应力也较高。

金属材料可以通过正确的热处理来改变材料的组织状态，以提高其断裂韧性。

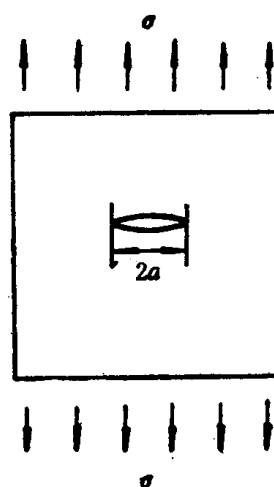


图 1—11 带有裂纹的试样

第二章 金属的晶体结构和结晶

第一节 金属的概念

一、金属是晶体

自然界中的固体物质分为非晶体和晶体两大类。普通玻璃、松香等是非晶体，金属是晶体。晶体的主要特点是（1）组成晶体的原子、离子或分子在三维空间中按一定的几何形式有规则地排列，具有一定的外形；（2）性能具有各向异性和一定的熔点。如纯铁的熔点为 1538°C ，纯铜的熔点为 1083°C 等。

二、金属键

众所周知，金属的原子是由原子核和围绕其运动的电子所构成。一般，金属原子的外层价电子数少，这些外层电子与原子核之间的结合力较弱，很容易脱离轨道成为自由电子，作不规则运动形成所谓电子气（又称电子云）。失去电子的原子成了正离子，并在平衡位置上作一定频率的振动，如图 2—1 所示。由于这些电子气与正离子之间产生的静电引力和离子与离子、电子与电子之间的斥力相平衡，使金属原子结合在一起。金属的这种结合方式称为金属键。

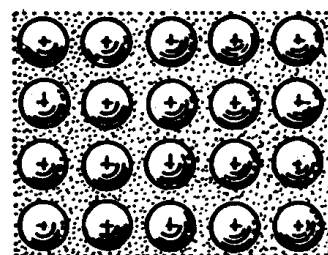


图 2—1 金属的原子结合示意图