

普通高等教育“十一·五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



DIANCHANG
JINSHU CAILIAO

电厂 金属材料

(第三版)

宋琳生 主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



DIANCHANG JINSHU CAILIAO

电厂金属材料

(第三版)

主 编 宋琳生



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材,是热能与动力工程专业技术基础课教材,全书共分七章,除包括金属学原理、热处理、金属材料的基本知识外,还以一定篇幅阐述了高温金属材料的原理、性能和应用,以及电厂常见金属材料的失效、设备事故分析等内容。

本书为高等学校热能与动力工程专业教材,也是电厂汽轮机、锅炉、辅机以及修造行业技术人员自学教材。同时也可作为电力系统金属材料培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

电厂金属材料/宋琳生主编. —3版. —北京:中国
电力出版社, 2006
普通高等教育“十一五”规划教材
ISBN 7-5083-4636-X

I. 电... II. 宋... III. 发电厂—金属材料—高等
学校—教材 IV. TG14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 094640 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

· 1990 年 10 月第一版

2006 年 8 月第三版 2006 年 8 月北京第十三次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 11.25 印张 270 千字

印数 51841—55840 册 定价 18.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前 言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神，加强教材建设，确保教材质量，中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校，满足学科发展和人才培养的需求，坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为修订教材。

根据专业的特点和要求，本次修订更注重理论与工程实践的结合，并反映当今大机组、高参数动力设备所使用的金属材料的新技术、新知识和新水平。修订后的教材，基本保持原书框架，对于教材中金属材料的牌号和相关技术术语、符号、量和单位均按照最新的国家标准进行更新。

在本书的修订过程中，得到了上海锅炉厂王德泰、东方汽轮机厂王培德、华东电力试验研究院刘琦和顾亚平、华东电力设计院陈子安、上海电力学院石钢生等同志的帮助，在此表示衷心的感谢。本书中难免存在错误和不妥之处，请读者批评指正。

编 者

2006年6月

第三版前言

《电厂金属材料》原为 46 万多字的技术参考书，1978 年写就，1979 年由原水利电力出版社编辑出版。

原水利电力部在镇江召开的会议上，制定了电厂热能动力专业《电厂金属材料》的教学大纲，并由西安交通大学、浙江大学、东北电力学院等院校建议修改该书作为教材使用。编者就在原书的基础上，精简改写成了教科书。1988 年 5 月在原武汉水利电力学院召开的机械类教学委员会会议上，正式定为电厂热能动力专业的教材。

这一次中国电力教育协会又将《电厂金属材料》第二版列入了普通高等教育“十五”规划教材，由编者再一次修改。

这几年我国电力工业发展很快，已能自行设计、制造 60 万机组，还安装了 90 万机组。这些大机组高参数动力设备所使用的金属材料在第二版中已有所反映。现根据需要还将火电厂中用材较多的耐磨件也编了进去，某些金属材料的牌号和某些技术术语及其表示符号也按照新的国家标准作了更新。

整理第二版文稿时，得到了上海锅炉厂王德泰、东方汽轮机厂王培德、华东电力试验研究院刘琦和顾亚平、华东电力设计院陈子安、上海电力学院石钢生等同志的帮助，特此感谢。本书的错误和不妥之处仍然会有，请读者批评指正。

编 者

2003 年 5 月

目 录

前言	
第二版前言	
绪论	1
第一章 金属材料的基础知识	3
第一节 金属材料的性能	3
第二节 金属的晶体结构与结晶	12
第三节 金属的塑性变形与再结晶	21
第四节 合金的相结构及二元合金相图	28
复习思考题	37
第二章 铁碳相图及其合金	39
第一节 铁碳合金的相结构	39
第二节 铁碳合金相图	40
第三节 碳钢	49
第四节 铸铁	52
复习思考题	59
第三章 钢的热处理	60
第一节 钢在加热时的转变	60
第二节 奥氏体在冷却时的转变	62
第三节 钢的淬火和回火	72
第四节 钢的退火和正火	78
第五节 钢的化学热处理	80
复习思考题	83
第四章 合金钢	85
第一节 合金元素对钢的影响	85
第二节 合金钢的分类及编号方法	88
第三节 合金结构钢	90
第四节 合金工具钢	95

第五节 特殊性能钢	98
复习思考题	104
第五章 耐热钢	105
第一节 耐热钢的高温性能	105
第二节 耐热钢的化学稳定性	109
第三节 耐热钢的组织稳定性	114
第四节 耐热钢中的合金元素及其作用	116
第五节 耐热钢的分类	118
复习思考题	120
第六章 有色金属及其合金	121
第一节 铝及其合金	121
第二节 铜及其合金	123
第三节 钛及其合金	127
第四节 轴承合金	128
复习思考题	129
第七章 锅炉与汽轮机用钢及事故分析	131
第一节 锅炉主要设备用钢及事故分析	131
第二节 汽轮机主要零部件用钢及事故分析	140
第三节 螺栓用钢及断裂事故分析	153
第四节 耐磨件及磨损失效分析	159
复习思考题	164
附录 国内外钢号对照表*	165
参考文献	171

绪 论

《电厂金属材料》是为高等学校热能与动力工程专业学生编写的技术基础课教材, 主要结合电厂锅炉和汽轮机应用金属材料的情况阐述金属学知识, 并专门列了一章介绍锅炉和汽轮机主要零部件用钢及其事故分析。

金属学是研究金属材料的成分、组织和性能之间关系的一门学科。由于金属材料有许多优良的性能, 所以它是应用极为广泛的工程材料。金属材料的性能是由其内部的组织结构所决定的, 不同的组织结构, 就会有不同的性能。而金属材料的组织结构, 则因其化学成分、处理条件、应用工况的不同而有所不同。所以, 如果改变金属材料的化学成分、处理条件、应用工况, 金属材料的组织结构就会发生变化, 而金属材料的性能亦因之而改变。不同性能的金属材料, 在工程上有不同的用途。

金属学主要由两大部分内容组成, 一部分是金属的基础理论, 其中包括金属的性能、金属的晶体结构与结晶、金属的塑性变形与再结晶、合金理论、钢铁合金相图、钢的热处理; 另一部分是介绍工业上常用的金属材料(碳钢、铸铁、合金钢、有色金属及其合金等)的牌号、成分、组织、性能及其应用。有些书将重点放在介绍金属材料及热处理知识上, 书名就叫做《金属材料及热处理》; 本书则因密切结合火力发电厂的实际而编写的, 故定名为《电厂金属材料》。

金属材料是工农业和科学技术发展的重要基础。机器设备的零部件大多数都是用各种不同性能的金属材料来制造的, 人们的日常生活用具也离不开金属材料。学习并掌握了有关金属学的知识后, 才能正确地选用金属材料, 合理地制定不同金属材料的加工工艺, 充分发挥金属材料的作用。

电力工业是国民经济的先行工业。随着电力工业的发展, 火力发电厂中大容量、高参数的锅炉和汽轮机机组逐渐增多, 对电厂金属材料的要求也愈来愈高。由于电厂金属材料多数是在高温、高压和有腐蚀性的介质工况下长期工作, 会发生组织和性能的变化, 甚至可能引起某些零部件失效。零部件失效后, 往往会造成事故, 直接影响火力发电厂的安全生产。因此, 火力发电厂有关技术人员, 除了要懂得金属学的一般知识外, 还要了解和掌握电厂金属材料在运行过程中组织和性能的变化规律, 正确及时地处理金属零部件失效问题。

人类社会的文明和进步是与金属材料的应用和发展分不开的。在应用和发展金属材料上, 我国曾经有过伟大的贡献。远在公元前 1700 多年, 我国就掌握了冶炼青铜的技术, 懂得了按不同的化学成分比例冶炼锡青铜, 具有不同的性能, 用来制造不同使用要求的器具; 随后又发明了炼铁术。春秋、战国时代, 已经应用钢铁材料来制造农具、手工业器具和兵器。到了汉、唐、宋等朝代, 进一步发展了生产和应用金属材料的技术; 一直到明朝, 我国应用金属材料方面在世界上还是处于遥遥领先的地位。据史料记载, 欧洲的炼铁术是由我国传授过去的, 我国应用铁器的历史要比欧洲早一千多年。在我国早期的科学技术著作中, 如先秦的《考工记》、宋代沈括的《梦溪笔谈》、明代宋应星的《天工开物》等, 都记载了关于金属材料的冶炼、铸造、焊接和热处理等方面的珍贵资料。五百年前的《天工开物》著作

中，有关锉刀制造、翻新和热处理工艺有如下记述：“凡铁锉，纯钢为之，未键之时，钢性亦软，以已键钢铰划成纵斜纹理，划时斜向，则文成方焰，划后烧红，退微冷，入水键。久用乖平，入火退键性，再用铰划。”从以上这段记载中可见，当时我国已经完全掌握了淬火和退火的操作工艺，懂得了热处理对性能的影响及其规律，热处理技术已发展到相当高的水平。我们不能妄自菲薄，应该奋发图强，继承和发扬光荣的历史传统，努力发展国民经济，努力发展科学技术，深入开展对金属材料的科学研究，为人类社会的进步和发展继续作出应有的贡献。

电厂金属材料是一门实践性较强的学科，在学习本课程时，必须重视实验课的学习，重视金工实习和工艺学的学习，加强理论联系实际。而且，本课程理论系统性较强，概念较多，在学习过程中必须及时复习巩固，在理解的基础上加强记忆，融会贯通。

第一章 金属材料的基础知识

第一节 金属材料的性能

在日常生活和工程设备中,所应用的金属材料是多种多样的。金属的性能是选择和使用材料的依据。金属的性能包括使用性能和工艺性能。使用性能是指材料的物理、化学性能和力学性能;工艺性能是指金属的铸造性能、锻造性能、焊接性能、热处理性能和切削性能。

一、金属材料的工艺性能

金属制品和机械零件在制造过程中要经过冶炼、铸造、锻造(或铆焊),以及切削加工和热处理等一系列的工艺过程。金属材料适应冷热加工的能力,称为加工工艺性能,简称工艺性能。工艺性能好的材料易于承受加工,生产成本低;工艺性能差的材料在承受加工时工艺复杂、困难,不易达到预期的效果,加工成本也高。

(一) 铸造性能

金属材料的生产,多数是通过冶炼、铸造而得到的,如各种机械设备的底座,汽轮机、发电机的机壳、阀门,磨煤机的耐磨件等。液体金属浇注成型的能力,称为金属的铸造性能。它包括流动性、收缩率和偏析倾向等。

流动性是指金属对铸型填充的能力。金属的流动性好,可以浇注成外观整齐、薄而形状复杂的零部件。在常见的金属材料中,铸铁的流动性优于钢,青铜的流动性比黄铜好,可以容易地制造各种零件。

收缩率是指铸件冷凝过程中体积的减少率,称为体积收缩率。金属自液态凝结成固态时体积要减少,使铸件形成缩孔和疏松,即形成集中或分散的孔洞,严重影响金属零件的质量。铸件或铸锭集中的孔洞叫做缩孔,铸件在造型时应预留冒口,以便将缩孔留在冒口内,铸后将冒口切掉。疏松是数量很多而分散的小缩孔,缩孔和疏松都使材料的性能下降,甚至导致失效。收缩率大的金属,形成缩孔和疏松的倾向大。

铸件冷凝时,由于种种原因会造成化学成分的不均匀,叫做偏析。偏析使整体冲击韧性降低,质量变坏。

缩孔、疏松和偏析等铸造缺陷都是不允许产生的,在生产过程中应予以消除。

(二) 锻造性能

重要零件是毛坯往往要经过锻造工序,如汽轮机、发电机的主轴、轮毂、叶片,大型水泵和磨煤机的主轴、齿轮等。材料承受锻压成型的能力,称为可锻性。

金属的锻造性能可用金属的塑性和变形抗力(强度)来衡量。金属承受锻压时变形程度大而不产生裂纹,其锻造性能就好。换句话说,金属承受锻压时变形抗力(变形时抵抗外力的大小)越小,即锻压时消耗的能量越小时,其锻造性能就越好。

金属的锻造性能取决于材料的成分、组织和加工条件,如锻造温度(始锻、终锻温度)、变形速度、应力状态等加工条件。通常碳钢具有较好的可锻性,低碳钢的可锻性最好。随着含碳量的增加,钢的可锻性降低。合金钢的可锻性略逊于碳钢。一般情况下,合金钢中合金

元素含量越多,其可锻性越差。铸铁则不能承受锻造加工。

金属的冷热弯曲性能也取决于材料的塑性和强度。电厂锅炉蒸汽管道弯头和水冷壁管道弯头是经过冷热弯曲成型的。材料承受弯曲而不出现裂纹的能力,称为弯曲性能。一般用弯曲角度或弯心直径与材料厚度的比值来衡量弯曲性能。

(三) 焊接性能

在电厂中有大量金属结构件是用焊接方法连接的,如锅炉管道、支架、蒸汽导管、输粉管道、风管、汽包、联箱等。金属材料采用一定的焊接工艺、焊接材料及结构形式,获得优质焊接接头的能力,称为金属的焊接性,也称为可焊性。

金属的焊接性能主要取决于材料的化学成分,也取决于所采用的焊接方法、焊接材料(焊条、焊丝、焊药)、工艺参数、结构形式等。衡量一种材料的焊接性,需要做焊接性试验,其方法是按国家标准焊接成十字形试样,再切片检验或做力学性能试验。钢的焊接性还可用碳当量方法进行估算。

影响钢的焊接性能的主要因素是钢的含碳量,随着含碳量的增加,焊后产生裂纹的倾向增大。钢中其它合金元素的影响相应小些。将合金元素对焊接性的影响都折合成碳的影响,即为碳当量,用符号 C_e 表示。其计算公式为

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} (\%)$$

式中, C 、 Mn 、 Cr 、 Mo 、 V 、 Ni 、 Cu 为钢中该元素的百分含量。

当 $C_e < 0.4\%$ 时,焊接性优良,焊接时可不预热。

$C_e = 0.4\% \sim 0.6\%$ 时,焊接性较差,焊接时需采用适当预热等工艺措施。

$C_e > 0.6\%$ 时,焊接性很差,焊接时需采用较高预热温度和较严格的工艺措施。

金属材料的热加工性能还包括热处理性能,如淬透性、淬硬性等,将在本书第三章中叙述。

(四) 切削性能

金属零件往往要经过机械加工成型,如车、铣、刨、磨、钻、镗等。金属材料承受切削加工的难易程度,称为切削性能。切削性能不但包括能否得到高的切削速度,是否容易断屑,还包括能否获得较高的光洁度,表面质量如何等等。

金属的切削性能与材料及切削条件有关,如纯铁很容易切削,但难以获得较高的光洁度;不锈钢可在普通车床上加工,但在自动车床上,却难以断屑,属于难加工材料。通常,材料硬度低时切削性能较好,但是对于碳钢来说,硬度如果太低时,容易出现“粘刀”现象,光洁度也较差。一般情况下,金属承受切削加工时的硬度在 $HB170 \sim 230$ 之间为宜。

二、金属材料的力学性能

力学性能是指金属材料在外力作用下,所表现出来的抵抗变形和破坏的能力以及接受变形的能力,旧称为机械性能。机械设备能否安全运行,在很大程度上取决于金属材料的力学性能。

金属在常温时的力学性能指标有强度、塑性、韧性、硬度、断裂韧性等。这些性能指标均是通过一定的试验方法测试出来的。

(一) 强度和塑性

强度是指金属在受到外力作用时,抵抗变形和破坏的能力。金属材料由于受力、变形及破坏情况不同,强度可分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、扭转强度、剪切强度和疲劳强度等。由于某些特殊用途的轻质高强度材料的出现,又出现比强度(强度/比重)的概念。

电厂设备在几百摄氏度的高温下运行, 金属还有高温强度等, 这些内容将在第五章中叙述。

按照国家标准对材料进行各种破坏性试验(如拉伸、压缩、弯曲、扭转、剪切、疲劳试验等), 可测得金属相应的强度指标。这些试验中最常用的是拉伸试验, 通常所说的材料强度, 就是指抗拉强度。例如, 金属材料手册中所载的普通碳钢, 是根据拉伸试验所测得的抗拉强度、断后伸长率和断面收缩率等作为主要考核指标。

1. 拉伸试验

依照材料试验的国家标准, 将材料制成图 1-1 所示的拉伸试样, 在拉伸试验机上施加一个缓慢增加的拉力 F , 试样便随着拉力的增加而变形, 直至断裂。图中 d 为试样直径, L_0 为试样测量长度, 称为标距, 试样的详细尺寸和表面粗糙度均依国家标准制备。

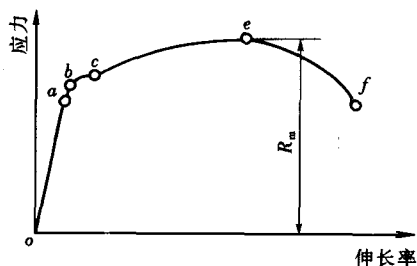


图 1-2 低碳钢的应力-伸长曲线

将制成的标准试样在拉伸试验机上加力, 试样所受外力与伸长的关系, 可用应力-伸长关系曲线表示出来, 如图 1-2 所示。应力 $R = F/S_0$, S_0 为试样受力前的截面积, $S_0 = \pi d^2/4$; 伸长率用相对伸长表示, 伸长率又称延伸率。

材料不同, 其应力-伸长关系曲线的形状不同。塑性材料(如低碳钢)在被拉断前有明显的屈服和颈缩, 而弹性材料(如弹簧钢)和脆性材料(如工具钢和铸铁)却没有这种明显的变化。图 1-3 是不同材料的拉伸曲线, 从曲线上可以看出, 在开始加力的阶段, 曲线都有一直线部分, 这时应力-伸长呈线性关系, 遵从虎克定律。这说明, 任何材料在开始受力时, 先发生弹性变形。随着应力的逐渐加大, 材料由弹性变形转为塑性变形或断裂。

2. 强度和塑性

从低碳钢的拉伸曲线(图 1-2)中可以看出, oa 段是直线, 材料处于弹性变形阶段, 这时如果去掉外力, 试样仍可恢复到未变形前的状态。 a 点所对应的应力, 过去称为比例强度。 b 点所对应的应力过去称为弹性强度, 去掉外力后试样会保留微小的塑性变形量。 c 点所对应的应力值称为屈服强度, 所谓屈服强度是指当金属材料呈现屈服现象时, 在试验期间达到塑性变形而外力并不增加的应力点, 过去又称屈服极限, 也有人称之为屈服点, 过去用符号 σ_s 来表示。强度往往是某特性的最大应力值, 又叫做极限。又如比例极限、弹性极限、强度极限。

屈服强度可分为上屈服强度和下屈服强度, 上屈服强度是指试样发生屈服而外力首次下降前的最高应力用 R_{eH} 符号表示; 下屈服强度是指在屈服期间, 不计初始瞬时的最低应力用

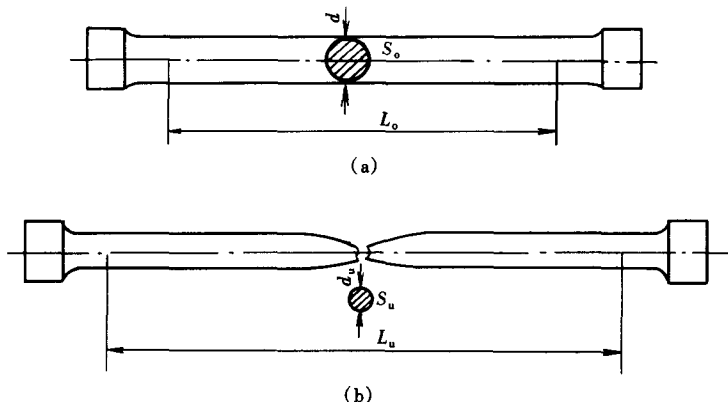


图 1-1 拉伸试样

(a) 标准试样; (b) 被拉断后的试样

R_{cl} 符号表示。 R_{ch} 及 R_{cl} 在不同类型曲线上的位置, 见图 1-3 所示。

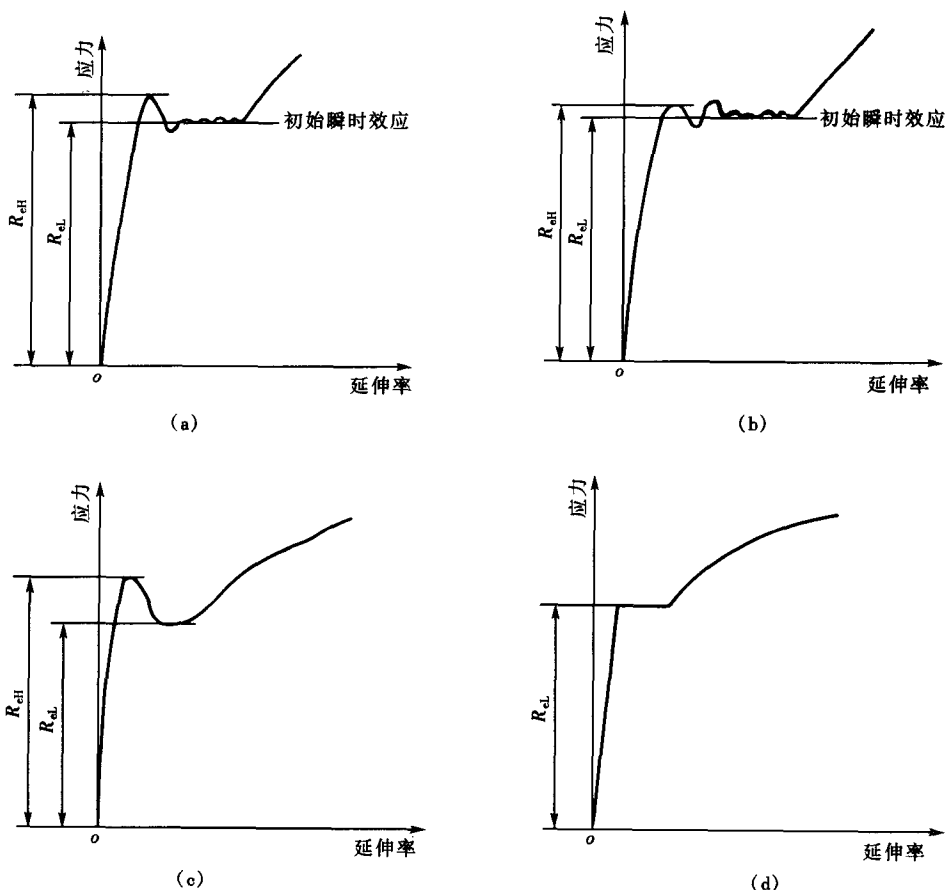


图 1-3 不同类型曲线的上屈服强度和下屈服强度 (R_{ch} 和 R_{cl})

一般机械零件和工程结构件都不允许在使用中产生塑性变形, 否则会因失效而发生事故。所以屈服强度是机械设计和工程设计中的重要依据。

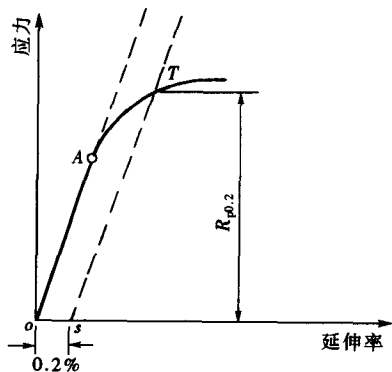


图 1-4 规定非比例延伸强度 (R_p) 拉伸图

在拉伸试验机上对试样继续增加拉力, 金属材料就发生了明显的塑性变形 (图 1-2 曲线中的 ce 段); 在明显塑性变形的同时, 应力值也有所增加。 e 点所对应的应力值, 称为抗拉强度, 用 R_m 表示, 过去是用 σ_b 表示的。当材料所承受的应力值超过抗拉强度时, 塑性变形继续增加, 但应力反而降低了, 这时试样出现颈缩, 最后导致断裂。抗拉强度 R_m 也是机械设计和工程设计的重要依据。

有的材料 (如高碳钢、弹簧钢等) 在拉伸时没有明显的屈服现象, 需要用作图的方法来求得屈服时的强度值, 它们的拉伸曲线及作图法, 如图 1-4 所示。根据国家标准, 材料在受拉时, 发生微小塑性变形 ($\epsilon_p = 0.002 = 0.2\%$) 时的应力值称为材料的规定非比例延伸强度, 以 $R_{p0.2}$ 表示。

图中 T 点所对应的应力为规定非比例延伸强度, 过去称为条件屈服强度, 用 $\sigma_{0.2}$ 表示。

金属的塑性是指材料产生塑性变形而不破坏的能力。在拉伸试验中, 材料的塑性用断后伸长率 A 和断面收缩率 Z 表示。拉伸试验的试样被拉断后, 其标距部分所增加的长度与原标距的比值的百分率称为断后伸长率或延伸率:

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100\%$$

式中 L_u ——试样被拉断后标距的长度 (图 1-1)。

拉伸试样被拉断后, 其横截面积的缩减量与试验前试样的截面积之比的百分率, 称为断面收缩率:

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100\%$$

式中 S_u ——颈缩处的截面积。

工程上以材料的断后伸长率或断面收缩率确定材料的塑性。塑性很差的材料称为脆性材料, 一般认为 $A < 5\%$ 的材料称为脆性材料。断后伸长率过去用符号 δ 表示的; 断面收缩率过去则用符号 ψ 表示。

(二) 硬度

硬度是金属表面局部体积内抵抗外物压入的能力, 即材料抵抗局部塑性变形的能力。它可以作为衡量材料软硬程度的指标。硬度试验较之拉伸试验有许多优点, 首先是它一般可以不必像拉伸试验那样将材料制成试样再做破坏性试验, 只在工件表面试验即可; 其次, 硬度试验特别适合于脆性材料, 如淬火钢、硬质合金和表面硬化处理的材料; 硬度试验方法简便, 对工件的试验条件要求不高, 塑性材料的硬度值还可以近似地换算成强度指标。

1. 布氏硬度

布氏硬度试验是用一定直径 D (mm) 的钢球或硬质合金球为压头, 施以一定的试验力 F (kgf 或 N), 将其压入试样表面, 经规定的保持时间 t (s), 卸除试验力后试样表面将留下压痕, 见图 1-5 所示。测得压痕平均直径为 d (mm), 求得压痕球形面积 S (mm²)。试验力 F 除以压痕面积 S 所得的商即为布氏硬度值, 以符号 HB 表示:

$$HB = \frac{F}{S} \quad (\text{N/mm}^2)$$

通常布氏硬度值可按所测得的压痕平均直径 d 查表求出 HB 的具体数据, 其单位一般不标出。布氏硬度值的书写表示方法, 应包含下列几个部分: ①硬度数据; ②布氏硬度符号; ③球体直径; ④试验力; ⑤试验力保持时间 (10~15s 不标注)。

由于所用的压头材质不同, 因此布氏硬度值必须用不同的符号来区分。当压头为钢球时 (适用于 $HB \leq 450$ 以下的材料), 其符号为 HBS; 如果压头是用硬质合金球 (适用于 HB 在 450~650 较硬的材料), 符号则为 HBW。

例 1 120HBS10/1000/30, 表示直径 10mm 的钢球在 9.807kN (1000kgf) 试验力作用下, 保持了 30s 测得的布氏硬度值数据为 120。

例 2 500HBW5/750, 表示直径 5mm 的硬质合金球在 7.355kN (750kgf) 试验力作用

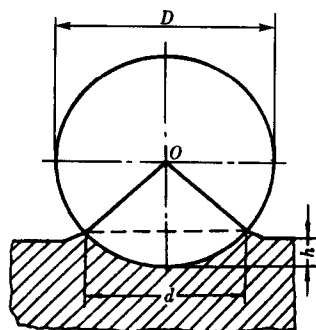


图 1-5 布氏硬度试验示意图

下,保持了 10~15s 所测得的布氏硬度数据为 500。

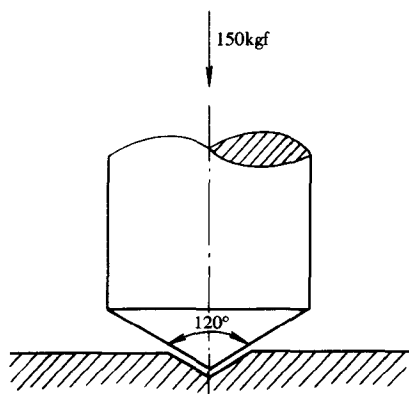


图 1-6 洛氏硬度试验示意图

2. 洛氏硬度

洛氏硬度测量原理与布氏硬度基本相同,但洛氏硬度不是根据压痕的面积,而是根据压痕深度确定硬度值,压痕越深,硬度越小,如图 1-6 所示。这样,可以将硬度值直接刻在表头上,以深度表示的硬度值可以从表上直接读出来,而不必像布氏硬度那样查表和计算。

洛氏硬度以 HR 表示,如果用 120°圆锥金刚石压头和 1.471kN 外力,就以 HRC 表示了。HRC 硬度值为两位数,适用范围在 HRC20~70 之间。这种测试硬度的方法,应用得最为广泛。

由于采用了金刚石压头和较小的外力, HRC 适合于硬度较大的材料。若用洛氏硬度测量退火钢、有色金属等较软的材料 ($HRC < 20$),则需用压头是直径为 1/16 英寸的淬火钢球及 980N 的外力以 HRB 表示;对于薄小工件,则需用 120°角的圆锥金刚石压头和 588N 的外力,以 HRA 表示。

洛氏硬度的优点是测量时操作简便,直接读数,在工件上留下的压痕较小,对工件的表面破坏程度小。但当被测材料的组织不均匀时,测量的结果不够精确,最好多测几个点,取其平均值。洛氏硬度适合测量较硬材料的硬度,如淬火钢等。

3. 维氏硬度

工程上常用的布氏和洛氏硬度 (HB 和 HRC) 分别适宜测量较软和较硬的材料,而维氏硬度却可测量从极软直到极硬的材料。

维氏硬度的测定原理基本上和布氏硬度相同,也是以压痕面积和力的商表示硬度值。所不同的是维氏硬度压头不是钢球,而是一个锥角为 136°的金刚石四棱锥体,如图 1-7 所示。试验时以压力为 F 的外力将压头压入工件表面,经一定时间后卸力,然后测量出压痕对角线长度 d ,计算出压痕面积 S ,以单位面积上的压力值表示维氏硬度:

$$HV = \frac{F}{S} = \frac{F}{\frac{d^2}{2 \sin 68^\circ}} = 1.8544 \frac{F}{d^2} \quad (\text{或 } N/mm^2)$$

与布氏硬度测量方法一样,也可用计算或查表法确定维氏硬度值。维氏硬度值的范围很宽,从 HV10~3000,适合于一切材料及表面淬火、化学热处理的工件。维氏硬度试验可以根据试样大小、厚薄和其他条件的不同选用 1~1176.84N 的外力。对于厚度较大、淬硬层较深、估计硬度较大的工件,宜选用较大的外力。但也应注意,对于 $HV > 500$ 的材料有可能将压头压碎,以选择小于 490N 的外力较好。维氏硬度试验常用的外力有 49, 98, 196, 294, 490, 980N 等。

维氏硬度的另一个优点是可以配合显微镜在小于 9.8N 的外力下测量材料的硬度,如测量某个金相组织中的某相的硬度等,称为显微硬度法,以 H_m 表示:

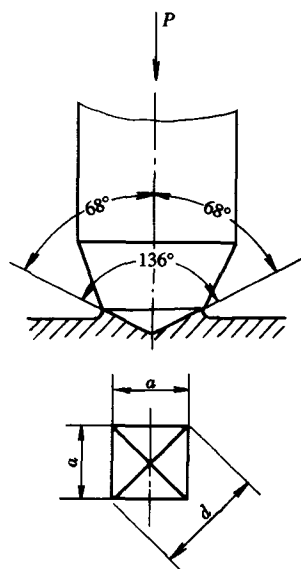


图 1-7 维氏硬度试验示意图

$$H_m = 1854.4 \frac{F}{d^2} \text{ (gf/mm}^2\text{)}$$

式中 F ——外力，常用 0.0196, 0.04904, 0.09807, 0.1961, 0.49035, 0.9807, 1.9614N 等；
 d ——压痕对角线平均长度。

维氏硬度的缺点是仍需要测量和查表，不能像洛氏硬度那样直接读出硬度值。

(三) 冲击韧性

机械零件在工作中除受静外力的作用之外，有时还承受动外力（有一定速度的冲击外力）的作用，只有强度、硬度、塑性等静外力的指标就不够了。冲击韧性是材料抵抗冲击性外力而不破坏的能力。

冲击韧性试验是在冲击试验机上做的。一般是把试样制成带缺口的形状，如图 1-8 所示的梅氏试样，其尺寸（mm）为 $10 \times 10 \times 55$ ，测量一次冲断时的冲击功，用来作为材料冲击韧性的值。冲击试验原理，如图 1-9 所示。试验时，将缺口背对摆锤刃，将摆锤提起至一定的高度 h_1 落下，将试样冲断后又升到 h_2 的高度。摆锤在冲断试样时所消耗的功可直接从试验机刻度盘读出来，称为冲击功，以 A_K 表示。据此还可求出单位面积上消耗的功 a_K ，称为冲击韧性。

$$a_K = \frac{A_K}{S} \text{ (J/cm}^2\text{)}$$

式中 S ——试样缺口处截面积。

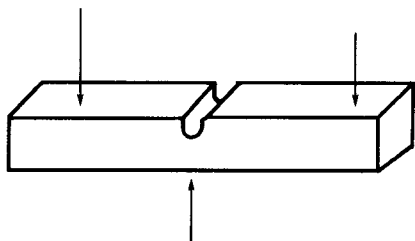


图 1-8 梅氏冲击试样

试样尺寸（mm）：10×10×50；槽深2mm；槽宽2mm

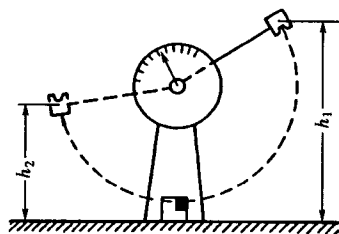


图 1-9 冲击试验原理图

对于标准试样，通常都直接用 A_K 表示其韧性。一般金属材料的 A_K 值大致为：灰铸铁、淬火的高强钢， $A_K < 8J$ ；未淬火、回火的中碳钢， $A_K = 24 \sim 40J$ ；淬火、回火后的碳钢及合金钢， $A_K = 40 \sim 120J$ 。

显然，材料的冲击韧性受材料的强度、塑性综合影响。

需要说明的是，这种试验方法作为衡量金属材料的韧性指标是不严格的，因为它与零件在实际工作中所承受冲击外力的情况不相符合。在实际工况中，零件往往不可能受到一次冲断那样大的冲击力，更多的是小能量多次冲击。但冲击韧性的试验方法能够灵敏地反映出金属的破断趋势和韧性。如钢的回火脆性、过热脆性都能在 A_K 值上反映出来，因此这种方法在生产上被广泛用于检验产品的质量。

上面讨论了金属材料的强度、塑性、硬度、韧性等最基本的力学性能指标，实际上这四者中真正独立的是强度和塑性。前者表示对变形和破坏的抗力，后者表示塑性变形的能力。硬度则是对局部塑变的抗力，它与强度有极为密切的关系，而韧性是受强度和塑性的综合影响。因此，在鉴别金属材料的力学性能时，常常是以强度和塑性为主要指标。

(四) 疲劳强度

在实际工作中,许多机器设备的零部件所承受的外力不仅大小可能改变,同时方向也会改变。这种交变的外力将在零件内部引起交变的应力。金属材料在交变应力作用下发生断裂的现象,称为“金属的疲劳失效”。汽轮机的轴及叶片等零部件的损坏,多数是“疲劳失效”引起的。

1. 疲劳失效的特点

疲劳失效的断口有其特殊性,一般是由两个明显的部分组成,如图 1-10 所示。一部分是疲劳裂纹扩展的部分,叫疲劳破坏范围(即图中 D 区),其特征是经过摩擦而较为光滑,晶粒较细,有时呈瓷状,甚至可观察到若干弧形或放射形的特征,有时能发现疲劳源中心及疲劳源数目。另一部分是突然断裂部分,叫瞬时脆性破断范围(即 G 区),其特征是断口呈光亮的结晶状或纤维状,晶粒较粗。两个区域之间有一明显的分界线,称为疲劳前沿线(即 acb 线)。

从疲劳断口的特征可以看出,疲劳裂纹的产生和发展与金属材料内部组织结构的变化有关。一般认为,在交变应力作用下,金属表面或断面内部的某一缺陷处由于应力集中开始产生微裂纹,这种微裂纹又在交变应力的继续作用下逐渐扩大,当剩余的断面(即 G 区)已不能承受所加的外力时,即发生了脆性断裂。

疲劳断口中两个区域的大小,与材质、交变应力的大小和有无应力集中现象密切相关。

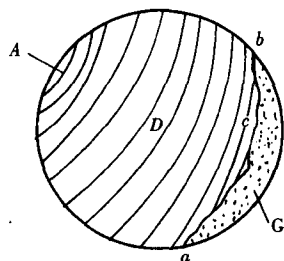


图 1-10 疲劳断口示意图

A—疲劳源; D—疲劳破坏区; G—瞬时脆性破断区; acb—疲劳前沿线

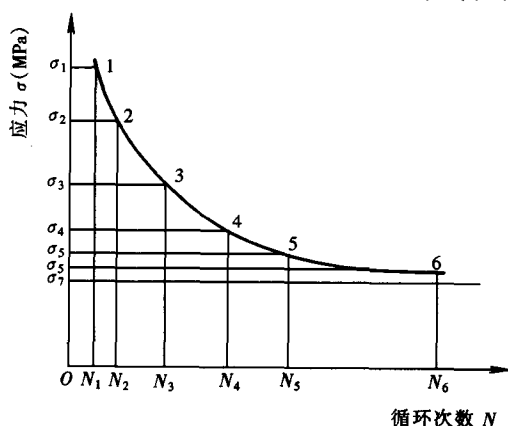


图 1-11 疲劳强度曲线

2. 疲劳强度的测定

金属材料在无限多次交变载荷的作用下,不致引起破裂的最大应力叫做疲劳强度。它是评定抗疲劳失效的性能指标。

测定金属材料的疲劳强度,普遍采用旋转弯曲式疲劳试验机,即在旋转的试样上加一弯曲外力,使试样内部产生拉一压的交变应力。为了测定某一金属材料的疲劳强度,试验时需要制成 6 个以上的同样试样。第一个试样在较大的应力 σ_1 作用下进行试验(钢的 $\sigma_1 \approx 0.6\sigma_b$),第二个及以后各个试样的试验应力 $\sigma_2, \sigma_3, \dots$ 等应依次减低 20~40MPa。在试验过程中分别记下每个试样破裂时的循环次数 $N_1, N_2, N_3, \dots$ 等。最后将试验结果,用应力 σ 为纵坐标,循环次数 N 为横坐标作图,画出该金属材料的疲劳强度曲线,如图 1-11 所示。

疲劳强度曲线又称 $\sigma-N$ 曲线。从曲线可以看出,交变应力 σ 愈低,循环次数 N 越多。