

普通高等教育



“十五”

规划教材

PUTONG
GAODENGJIAOYU
SHIWU
GUIHUA JIAOCAI

电厂金属材料 (第二版)

宋琳生 主编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

华北水利水电学院图书馆



208583157

TM62

S770

普通高等教育



“十五”

PUTONG
GAODENGJIAOYU
SHIWU
GUIHUA JIAOCAI

规划教材

电厂金属材料

(第二版)

宋琳生 主编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

858315

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十五”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. —2版. —北京: 中国电力出版社, 2003

普通高等教育“十五”规划教材

ISBN 7-5083-1703-3

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 (2003) 第 073725 号

中国电力出版社出版、发行

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

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

1990年10月第一版

2003年11月第二版 2003年11月北京第八次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 12印张 276千字

印数 32841—35840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)

序

由中国电力教育协会组织的普通高等教育“十五”规划教材，经过各方的努力与协作，现在陆续出版发行了。这些教材既是有关高等院校教学改革成果的体现，也是各位专家教授丰富的教学经验的结晶。这些教材的出版，必将对培养和造就我国 21 世纪高级专门人才发挥十分重要的作用。

自 1978 年以来，原水利电力部、原能源部、原电力工业部相继规划了一至四轮统编教材，共计出版了各类教材 1000 余种。这些教材在改革开放以来的社会主义经济建设中，为深化教育教学改革，全面推进素质教育，为培养一批批优秀的专业人才，提供了重要保证。原全国高等学校电力、热动、水电类专业教学指导委员会在此间的教材建设工作中，发挥了极其重要的历史性作用。

特别需要指出的是，“九五”期间出版的很多高等学校教材，经过多年的教学实践检验，现在已经成为广泛使用的精品教材。这批教材的出版，对于高等教育教材建设起到了很好的指导和推动作用。同时，我们也应该看到，现用教材中有不少内容陈旧，未能反映当前科技发展的最新成果，不能满足按新的专业目录修订的教学计划和课程设置的需要，而且一些课程的教材可供选择的品种太少。此外，随着电力体制的改革和电力工业的快速发展，对于高级专门人才的需求格局和素质要求也发生了很大变化，新的学科门类也在不断发展。所有这些，都要求我们的高等教育教材建设必须与时俱进，开拓创新，要求我们尽快出版一批内容新、体系新、方法新、手段新，在内容质量上、出版质量上有突破的高水平教材。

根据教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的精神，“十五”期间普通高等教育教材建设的工作任务就是通过多层次的教材建设，逐步建立起多学科、多类型、多层次、多品种系列配套的教材体系。为此，中国电力教育协会在充分发挥各有关高校学科优势的基础上，组织制订了反映电力行业特点的“十五”教材规划。“十五”规划教材包括修订教材和新编教材。对于原能源部、电力工业部组织原全国高等学校电力、热动、水电类专业教学指导委员会编写出版的第一至四轮全国统编教材、“九五”国家重点教材和其他已出版的各类教材，根据教学需要进行修订。对于新编教材，要求体现电力及相关行业发展对人才素质的要求，反映相关专业科技发展的最新成就和教学内容、课程体系的改革成果，在教材内容和编写体系的选择上不仅要有

本学科(专业)的特色,而且注意体现素质教育和创新能力与实践能力的培养,为学生知识、能力、素质协调发展创造条件。考虑到各校办学特色和培养目标不同,同一门课程可以有多本教材供选择使用。上述教材经中国电力教育协会电气工程学科教学委员会、能源动力工程学科教学委员会、电力经济管理学科教学委员会的有关专家评审,推荐作为高等学校教材。

在“十五”教材规划的组织实施过程中,得到了教育部、国家经贸委、国家电力公司、中国电力企业联合会、有关高等院校和广大教师的大力支持,在此一并表示衷心的感谢。

教材建设是一项长期而艰巨的任务,不可能一蹴而就,需要不断完善。因此,在教材的使用过程中,请大家随时提出宝贵的意见和建议,以便今后修订或增补。(联系方式:100761 北京市宣武区白广路二条1号综合楼9层 中国电力教育协会教材建设办公室 010-63416222)

中国电力教育协会

二〇〇二年八月

第一版序言

本书是根据 1987 年 4 月原水利电力部直属高等学校金属材料教学协作组会议十一所院校讨论通过的《电厂金属材料》教学参考大纲编写的, 1988 年 5 月在武汉水利电力学院召开的机械类教学委员会会议上定为电厂热能动力专业教材。本书还可作为电力职工大学、各类讲习班的教材, 并可供火电厂、电力修造企业的技术人员参考。

本书从各院校多年来的教学要求出发, 既注重金属学的基本知识, 又强调知识的实用性, 密切结合生产实际和日益发展的大型火力发电厂对新材料的要求, 力求使学生具备在设计、运行和维修工作中必需的金属材料知识和选材、用材的能力, 特别是对热力设备和辅机耐热、耐蚀、耐磨材料的选用能力。

本书由上海电力学院宋琳生主编、华北电力学院齐纪渝参加编写, 由武汉水利电力学院林咸成主审。

由于水平有限, 书中的错误和不妥之处一定不少, 恳切希望读者批评指正。

编 者

1989 年 11 月

第二版序言

《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 kW 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

序

第一版序言

第二版序言

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	14
第三节 金属的塑性变形与再结晶	23
第四节 合金的相结构及二元合金相图	31
复习思考题	41
第二章 铁碳相图及其合金	43
第一节 铁碳合金的相结构	43
第二节 铁碳合金相图	44
第三节 碳钢	55
第四节 铸铁	58
复习思考题	65
第三章 钢的热处理	66
第一节 钢在加热时的转变	66
第二节 奥氏体在冷却时的转变	69
第三节 钢的淬火和回火	80
第四节 钢的退火和正火	86
第五节 钢的化学热处理	88
复习思考题	91
第四章 合金钢	93
第一节 合金元素对钢的影响	93
第二节 合金钢的分类及编号方法	97
第三节 合金结构钢	99
第四节 合金工具钢	104

第五节 特殊性能钢	106
复习思考题	113
第五章 耐热钢	114
第一节 耐热钢的高温性能	114
第二节 耐热钢的化学稳定性	118
第三节 耐热钢的组织稳定性	124
第四节 耐热钢中的合金元素及其作用	126
第五节 耐热钢的分类	129
复习思考题	130
第六章 有色金属及其合金	131
第一节 铝及其合金	131
第二节 铜及其合金	133
第三节 钛及其合金	137
第四节 轴承合金	139
复习思考题	140
第七章 锅炉与汽轮机用钢及事故分析	141
第一节 锅炉主要设备用钢及事故分析	141
第二节 汽轮机主要零部件用钢及事故分析	151
第三节 螺栓用钢及断裂事故分析	164
第四节 耐磨件及磨损失效分析	170
复习思考题	175
附录 国内外钢号对照表	176
主要参考书目	182

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科学。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、高压和腐蚀介质作用下长期运行，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，以已键钢铍划成纵斜纹理，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，再用铍划。”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

在日常生活和工程技术中，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：

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

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 HB170~230 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,也称为力学性能。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

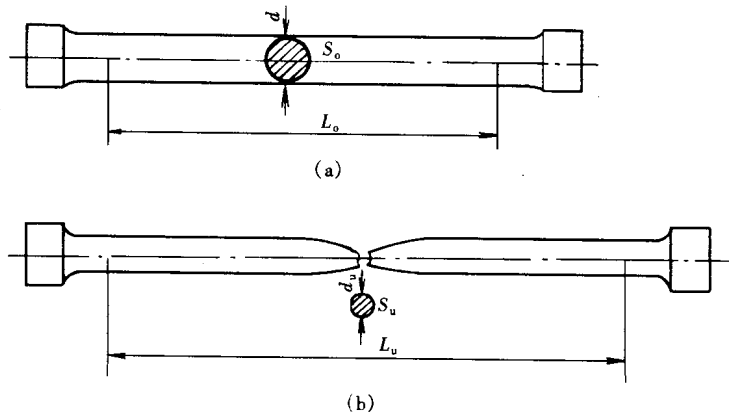


图 1-1 拉伸试样

(a) 标准试样; (b) 被拉断后的试样

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。

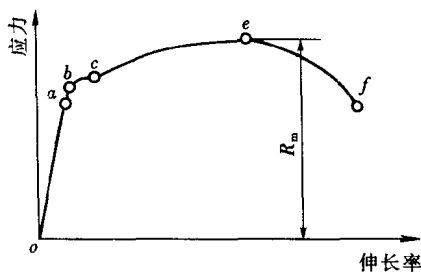


图 1-2 低碳钢的应力-伸长曲线

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。

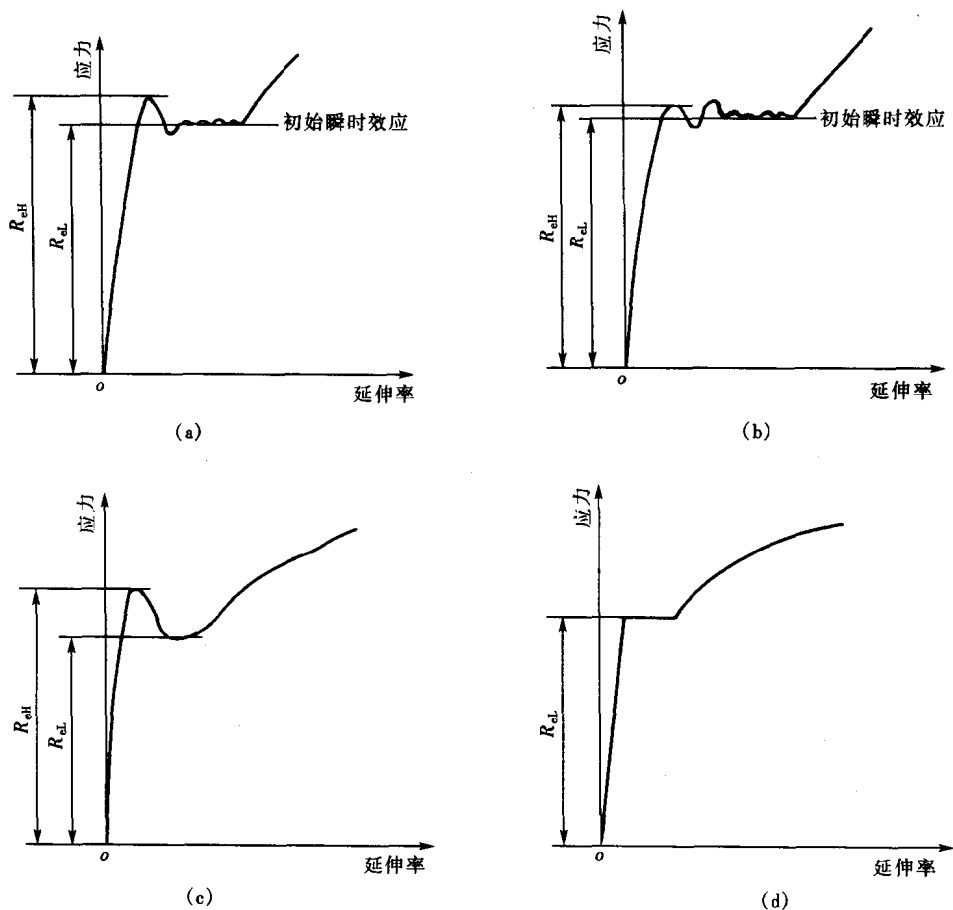


图 1-3 不同类型曲线的上屈服强度和下屈服强度 (R_{eH} 和 R_{eL})

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，过去又称屈服强度，也有人称之为屈服点，过去用符号 σ_s 来表示。

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

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依据。

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其屈服时的强度值，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。

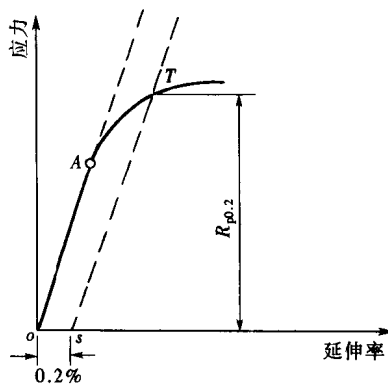


图 1-4 规定非比例延伸强度 (R_p) 拉伸图

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。

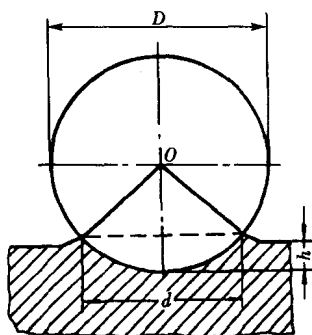


图 1-5 布氏硬度试验示意图

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) 试验力作用下，保持了 10~15s 所测得的布氏硬度数据为 500。

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

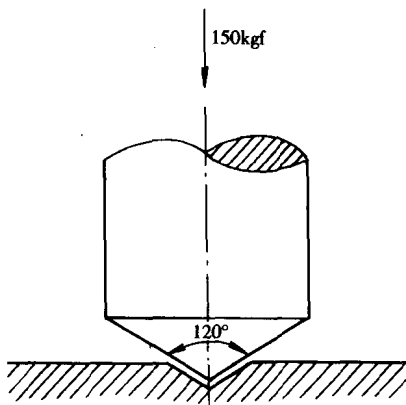


图 1-6 洛氏硬度试验示意图