



国产20万千瓦机组培训班讲义

电厂金属材料

吴世运 吴孝恺

水利电力部生产司



前 言

我国电力工业发展已进入大机组、高参数、高度自动化的时代和单元集中控制的运行方式。“七五”期间，国产二十万千瓦汽轮发电机组将成为我国电厂中的主力机组之一，为了提高二十万千瓦机组电厂的机、炉运行值班人员素质和技术水平。自一九七九年起委托西安电力学校举办国产二十万千瓦机组运行培训班，并编写了教材，经过多次学习班试用反映良好，在试用教材的基础上经过整理、补充和修订，编写成《国产二十万千瓦机、炉运行培训讲义》。以满足二十万千瓦机组运行人员的培训和广大电力职工自学需要。也可供技校和中专师生参考。这套书包括《热工学基础》、《电厂金属材料》、《汽轮机调节》、《汽轮机运行》、《汽轮机设备》、《汽轮机辅助设备及热力系统》、《锅炉燃烧原理及设备》、《锅炉蒸发原理、设备，锅炉运行》、《热力过程自动化》、《锅炉自动控制系统》等。

西安电力学校有关同志为编写这套讲义付出了辛勤劳动，在此仅致谢意。

水利电力部生产司

一九八六年三月二十日

内 容 简 要

为了适应职工培训的需要,我们从发电厂运行和检修工作的实际出发,按照基本要求,阐述金属材料的化学成分、组织结构和性能三者之间的关系,以及金属材料在高温、高压及腐蚀介质中工作时性能的变化。

本书计量单位采用国际单位制(SI),如强度的单位用MPa(MN/m²,百万牛顿/平方米),它同一般沿用的单位kgf/mm²的关系为1MPa $\approx$ 0.1kgf/mm²;冲击韧性值 α_K 的单位用J/cm²(焦/厘米²),它同以往采用的单位kgf-m/cm²的关系为1J/cm² $\approx$ 0.1kgf-m/cm²。布氏硬度值仍沿用kgf/mm²作为单位,但通常不予标出。压强的单位同强度的单位,1标准大气压(atm)=101.325kPa $\approx$ 0.1MPa。

本书第一章至第四章由吴世运同志编写,第五章至第七章由吴孝恺同志编写,荣凤阁同志为本书复制了大量插图和图片。

由于我们的水平有限,经验不多,缺点与错误一定不少,恳切希望广大读者提出改进意见。

常用化学元素符号

符 号	名 称	读 音	符 号	名 称	读 音
Ag	银	银	Pb	铅	千
Al	铝	吕	S	硫	流
Au	金	今	Sb	锑	涕
B	硼	朋	Si	硅	归
C	碳	炭	Sn	锡	西
Co	钴	古	Ti	钛	太
Cr	铬	各	V	钒	凡
Cu	铜	同	W	钨	乌
Fe	铁	铁	Zn	锌	辛
H	氢	轻	Zr	锆	告
Mg	镁	美			
Mn	锰	猛			
Mo	钼	目			
N	氮	淡			
Nb	铌	尼			
Ni	镍	聂			
O	氧	养			
P	磷	林			

目 录

第一章 金属材料的基本知识.....	1
第一节 金属材料的物理、化学和工艺性能.....	1
第二节 金属材料的机械性能.....	4
第二章 铁碳合金.....	11
第一节 金属的组织结构.....	11
第二节 铁碳合金的晶体相.....	13
第三节 铁碳合金相图简介.....	15
第四节 碳素钢.....	21
第五节 铸铁.....	26
第六节 铸钢.....	29
第三章 钢的热处理.....	30
第一节 钢在加热时的变化.....	30
第二节 奥氏体在冷却时的转变.....	31
第三节 钢的退火和正火.....	34
第四节 钢的淬火与回火.....	35
第五节 钢的表面热处理.....	38
第四章 合金钢.....	41
第一节 合金钢的概念.....	41
第二节 合金结构钢.....	46
第三节 合金工具钢.....	56
第四节 耐磨材料.....	57
第五章 耐热钢.....	58
第一节 耐热钢的概念.....	58
第二节 耐热钢的分类.....	59

第三节	耐热钢的高温性能	60
第四节	耐热钢的化学稳定性	69
第五节	耐热钢的组织稳定性	75
第六节	耐热钢中的合金元素及其作用	80
第六章	有色金属及其合金	83
第一节	铜和铜合金	83
第二节	轴承材料	87
第三节	钛及钛合金简介	90
第七章	汽轮机、锅炉主要部件用钢	92
第一节	汽轮机叶片用钢	92
第二节	转子用钢	97
第三节	静止部分主要部件用钢	101
第四节	紧固件用钢	104
第五节	锅炉受热面管子和管道用钢	108
第六节	汽包及锅炉其它部件用钢	111
附录一	火力发电厂金属监督知识	115
附录二	400吨/时以上国产锅炉受热面钢管品种、数量一览表	119

第一章 金属材料的基本知识

第一节 金属材料的物理、化学和工艺性能

在日常生活和工程技术上，我们经常会遇到两种材料：金属材料和非金属材料。锅炉的水冷壁管、过热器管及再热器管，汽轮机的叶片、转子、叶轮、汽缸、隔板等，都是由金属材料制造的。金属材料的物理、化学和工艺性能、机械性能等，是衡量金属材料质量的标志。

一、金属材料的物理性能

金属材料的物理性能有：密度、比重、熔点、导热性、导电性、热膨胀性、磁性和耐磨性等。

（一）密度与比重

密度是单位体积内所具有的质量。它的单位是千克每立方米，即 kg/m^3 。常用金属材料的密度大致如下：铸钢为 $7.8 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ ，灰铸铁为 $7.2 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ ，碳钢为 $7.85 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ ，铜为 $8.9 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ ，黄铜为 $8.85 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ ，铝为 $2.7 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 。

比重是物质组成的物体的重量与它的体积之比。它的单位是牛顿/米³即 N/m^3 。比重的符号为 γ 。

各种材料都有固定的比重。在相同体积下，比重愈大的金属材料，其重量也愈大。金属材料的比重决定由它所制成的零件或结构的重量。在航空制造、宇航、人造卫星等设计制造中，某些高速运转的零件等都要要求尽可能减轻自重。这样就要选用比重小、强度高的材料，例如铝合金、钛合金等。根据材料的比重，可以计算出其重量，因此比重是材料的一个重要性能。

（二）熔点

金属材料在缓慢加热条件下，由固态开始熔化为液态时的温度叫熔点，单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。反之由液态凝固成固态时的温度叫做凝固点。从理论上说，同一种金属的熔点和凝固点相同。

在工业上常用的金属中，锡的熔点最低（为 231.9°C ），而钨的熔点最高（为 3410°C ）。合金材料在熔化时，除特殊合金外，不是在恒温下，而是在一个温度范围内进行的。

掌握各种金属和合金的熔点，对于铸造、焊接、镀锡以及配制合金等方面都很重要。例如熔点低的金属或合金，可以用来制造焊锡，保险丝，铅字等；熔点高的金属或合金可以用来制造过热器，汽轮机叶片，电热丝等耐热零件。

（三）导热性

所谓导热性就是金属材料传导热量的能力。一般用导热系数来表示金属材料导热性能的优劣。导热系数又称热导率，其符号为 λ ，单位为瓦特每米开尔文[W/(m·K)]。

金属的导热性愈差，在加热或冷却时零件表面和内部的温差就愈大，由此产生的内应力就愈大，就愈易发生裂纹。反之，导热性好的金属材料就不易发生这种情况。一般来说，导电性好的材料，其导热性也好。银的导热性最好，其次是铜和铝。凝汽器的冷却水管常用导热性好的铜合金来制造，以提高其冷凝效果。

(四) 导电性

金属材料传导电流的能力叫导电性。衡量金属材料导电能力的指标是电导率，其符号为 γ ，其值是电阻率 ρ 的倒数，即 $\gamma = 1/\rho$ 。 γ 的单位是西门子每米(S/m)。

显然，金属材料的电导率 γ 愈大，其导电性能就愈好。导电性以银为最好，其次是铜和铝。金属材料的导电性还与温度有关。合金的导电性一般比纯金属差。当材料的截面大小及其它条件相同时，金属的导电性愈好，则电流通过时所产生的热量就愈少，从而在输电过程中的电能损失就较小。因为银是一种贵重的金属，所以电气工程中广泛采用纯铜或纯铝作为导体。另一方面，金属材料的导电性愈差，则电阻愈大，电流通过它时所产生的热量就愈大，利用这一特点，可用高电阻的金属材料来制造电热元件，如电阻丝、电阻带等，常用的有铬镍合金、铁铬铝合金等。

(五) 热膨胀性

金属材料在加热时其体积增大的一种性能叫热膨胀性。一般是用线膨胀系数来表示金属材料的热膨胀性的大小。所谓线膨胀系数就是金属材料每升高1℃，所增加的长度与原来长度之比，其单位为“1/℃”，(或K⁻¹)。因此，线膨胀系数大的金属材料其热膨胀性就大；反之，就小。在生产实际中，必须考虑金属材料热膨胀性能所产生的影响。例如汽轮机转子与静子之间要留有足够的间隙，以防机组启动加热时，因其膨胀的差异而产生转子、静子磨损的设备损坏事故。紧固件则要求与被紧固部件的线膨胀系数相近。精密仪器的零件就要求采用线膨胀系数小的材料来制造。在异种金属焊接时，也要考虑它们的热膨胀系数是否接近，否则会因膨胀而使零件变形或损坏。

(六) 磁性

金属被磁化或吸引的性能称为磁性。根据这种性能的不同，常将金属材料分为铁磁材料、顺磁材料和逆磁材料三类。铁磁材料有铁、钴、镍等。它们在外磁场中能强烈地被磁化；顺磁材料有锰、铬、钨、钼等，它们在外加磁场中只是微弱地被磁化；逆磁材料有铜、锡、铅、锌等，它们能抗拒或削弱外加磁场对材料本身的磁化作用。

磁性材料是制造电机、电器中不可缺少的材料，如变压器、电机及测量仪表的铁芯是用工业纯铁、硅钢片制造的。另外还可利用磁性进行磁力探伤，以检查金属材料有无裂纹。

(七) 耐磨性

金属抵抗磨损的性能称为耐磨性，它可用磨损量来表示。显然，磨损量愈小，耐磨性愈高，反之则愈低。磨损量既可用试样表层的磨损厚度来表示，也可用试样体积或重量的减少来表示。火力发电厂中，风机叶片、磨煤机等在工作过程中都会受到磨损。汽轮机最后几级叶片，由于受到水滴的冲击，也会产生机械磨损作用，因此对于后几级叶

片材料，特别是大功率机组的后几级叶片材料，为了使其具有一定的耐磨性，往往采用表面处理的办法，以提高其耐磨性。

二、金属材料的化学性能

金属材料在室温或高温下，抵抗介质对它化学侵蚀的能力称为金属材料的化学性能。金属材料的化学性能，一般包括抗腐蚀性，抗氧化性等。

(一) 抗氧化性

所谓抗氧化性，就是指金属材料在高温时抵抗氧化性气氛腐蚀作用的能力。热力设备的高温部件，如锅炉的过热器、水冷壁管，汽轮机的汽缸、叶片等，长期在高温下工作，易产生氧化腐蚀。

我们知道，许多金属材料都能与空气中的氧进行化合而形成氧化物。如果金属表面形成的氧化物层比较疏松，这时外界氧气便可以继续与金属作用，这样就会使金属材料受到破坏，这种现象就叫做金属的氧化。如果金属表面形成的氧化物层比较紧密，而且牢固地复盖在金属表面上，就形成了一层保护层，使氧气不能再与金属接触，从而防止了金属的继续氧化，如象铝在空气中那样。电厂的热力设备，由于高温下工作，长期与氧气或氧化性气体接触，容易受到氧化腐蚀，为此，这些材料应有良好的抗高温氧化性。

钢的抗氧化性级别，按冶金部标准进行评定，如表1—1所示。

表1—1 钢的抗氧化性的评定

抗氧化性级别	分 类	年腐蚀深度 毫米/年
1	完全抗氧化性	≤ 0.1
2	抗氧化性	$> 0.1 \sim 1.0$
3	次抗氧化性	$> 1.0 \sim 3.0$
4	弱抗氧化性	$> 3.0 \sim 10.0$
5	不抗氧化性	> 10

(二) 抗腐蚀性

金属材料抵抗各种介质（大气、酸、碱、盐等）侵蚀的能力称为抗腐蚀性。发电厂中的热力设备如过热器管，水冷壁管，汽轮叶片、冷凝器管等许多部件都是在腐蚀介质中长期工作的。因此金属材料的抗腐蚀性是一个很重要的性能，如果金属材料的抗腐蚀性不好，会影响设备的安全运行。

金属材料的化学稳定性包括抗腐蚀性和抗氧化性两个方面。而金属材料在高温下的化学稳定性，又属于热稳定性的一部分。

三、金属材料的工艺性能

金属材料的工艺性能一般包括铸造性，焊接性，可锻性，切削加工性能等。

(一) 铸造性：液体金属铸造成型时所具有的一种性能叫铸造性。铸造性能一般是用液体的流动性、铸造时收缩率及偏析趋势等来表示其优劣。流动性是指液体金属充满

铸型的一种能力，收缩率就是指金属在结晶和凝固后，产生体积变化的程度，对于铸件来说，要求金属的收缩率要小，偏析是指铸件凝固后，其内部化学成分不均匀的一种现象。由于偏析，会造成金属材料各处的机械性能不一致，影响使用。

(二) 焊接性：一般是指两块相同的金属材料或两块不相同的金属材料，在局部加热到熔融状态下，能够牢固地焊合在一起的性能。焊接性能好的金属，在焊缝处不易产生裂缝，气孔，夹杂等缺陷，同时焊接接头具有一定的机械性能，否则就认为其焊接性能不好。焊接性能的好坏，决定于材料的化学成分，导热性，热膨胀性等。通常低碳钢的焊接性能较好，高碳钢和铸铁较差。

(三) 可锻性：金属材料在压力加工时，能改变形状而不产生裂纹的性能。可锻性的好坏，主要取决于材料的化学成分和加热温度。通常碳钢具有良好的可锻性，以低碳钢的可锻性最好，中碳钢次之，高碳钢较差。合金钢中低合金钢的可锻性近似于中碳钢，高合金钢的可锻性不如高碳钢。铸铁、硬质合金不能进行锻压加工。加热温度对金属可锻性能影响较大，温度提高，金属的可锻性提高。

(四) 切削加工性能：金属材料在用切削刀具进行加工时，所表现出来的性能。它主要用切削速度，加工表面光洁度和刀具耐用度来衡量。通常灰铸铁具有良好的切削性，钢的硬度在HB160—200范围内时，具有较好的切削性。

(五) 冷、热弯曲性能

冷、热弯曲性能是指金属材料在冷态或热态下能承受不同程度弯曲变形而不产生缺陷的能力。冷弯性能是检验材料塑性好坏的一种方法；热弯性能则是检查金属的热脆性的。

弯曲变形程度一般用弯曲角度或弯心直径 d 对材料厚度 a 的比值来衡量，弯曲角越大或弯心直径对材料厚度的比值越小，则试样的弯曲程度愈大。试样出现裂纹、断裂或起层前能承受的弯曲程度愈大，则材料的冷、热弯性能愈好。

弯曲性能是通过弯曲试验测定的。根据GB232—63规定，弯曲试验的弯曲程度分为下列三种类型：

- 1) 弯到规定角度（如外角为 90° 、 120° 等）；
- 2) 绕着弯心，弯到两面平行（即弯曲 180° ，弯心直径 d 等于试样厚度 a 的规定的倍数，如 $d=0.5a$ 、 $d=a$ 、 $d=2a$ 等）；
- 3) 弯曲到两面接触（即弯曲 180° ）的重合弯曲，此时弯曲处内部应形成自然圆弧。

金属材料的弯曲是靠弯曲处附近的塑性变形来实现的，因此弯曲性能愈好，塑性就愈大。

第二节 金属材料的机械性能

所谓材料的机械性能就是材料的力学性能，即材料抵抗外力作用的能力。常用的机械性能指标有：抗拉强度，屈服强度，延伸率，断面收缩率，硬度，冲击韧性，疲劳强度等。金属材料的机械性能是以实验为依据的。常用的机械性能试验是拉力试验，硬度试验

和冲击试验等。

一、强度

强度是材料在外力作用下对塑性变形和断裂的抵抗能力。强度和塑性等指标是通过拉力试验来测定的。拉力试验是把制成规定形状和尺寸的试样装在拉力试验机上，对试样施加缓慢增加的拉力，使它不断产生变形，直到拉断为止，根据拉力试验过程中的载荷及与载荷相对应的变形量，可以画出材料的拉伸试验曲线。图1—1就是低碳钢的应力应变拉伸图。从低碳钢的应力应变拉伸图上可以看出有以下特点：

(一) 比例极限 σ_P

图中a点称比例极限点，oa段是直线，说明在这个范围内，应力应变成正比例。与a点对应的应力值称为比例极限，用 σ_P 表示。

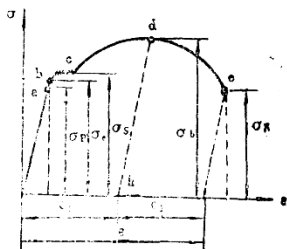


图 1—1 低碳钢的应力—应变示意图

$$\sigma_P = E \cdot \epsilon_P$$

式中 σ_P ——比例极限 单位：兆帕（MPa）；
 E ——弹性模量 单位：兆帕（MPa）；
 ϵ_P ——a点的应变值。

金属材料的E值越大，说明在一定应力作用下产生的弹性变形量越小。E主要决定于金属的晶格类型与晶格常数。但随着温度的升高，E值逐渐降低。对于要求弹性变形较小的零件，如汽轮机的主轴和叶片等，应选用弹性模量E大的材料。

(2) 弹性极限 σ_s

与a点非常接近的另一特点b，称为弹性极限点。与b点对应的应力值 σ_s 称为弹性极限。如外应力比 σ_s 低时，试样只产生弹性变形。 σ_s 的单位为兆帕。

(3) 屈服极限 σ_s

过了b点以后，曲线弯曲到C点，这一段曲线几乎水平，这表示应力未增加（或增加很少），而应变却在继续增加，试样产生了较为明显的塑性变形。这种现象称为“屈服”，C点称为屈服点。开始发生屈服现象时的应力称为屈服极限，用 σ_s 表示，它是代表金属材料抵抗塑性变形的指标。

有些材料如退火状态下的低碳钢有明显的屈服现象，屈服点的测定比较容易。但是，有些材料如高碳钢则没有明显的屈服现象。要测定屈服点很困难。所以工程上便规定产生塑性变形等于试验原来长度的0.2%时的应力值，叫“条件屈服极限”，用 $\sigma_{0.2}$ 表示，用它代替 σ_s ，其单位为兆帕。

(四) 强度极限 σ_b

过了C点，由于产生塑性变形后材料硬化，增加了抵抗变形能力，因而曲线又开始上升，到达d点，应力达最大值。与d点所对应的应力值 σ_b 称为强度极限。它是材料在受

拉过程中,发生断裂以前所能承受的最大应力值。了解强度极限有很重要的意义。金属材料决不能在承受超过其强度极限的载荷下工作,因为这样会很快导致破坏。 σ_b 的单位为兆帕。

二、塑性

塑性是指金属材料在外力作用下,产生塑性变形而不被破坏的能力。常用的塑性指标有:延伸率(δ)和断面收缩率(ψ)。

(一) 延伸率:

延伸率是指试样拉断后的总伸长与原始长度的比值的百分率,用 δ 表示,其公式如下:

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\%$$

式中

δ ——延伸率(%);

l_1 ——试样拉断后的长度, mm;

l_0 ——试样原始长度, mm。

(2) 断面收缩率

断面收缩率是指试样拉断后断面面积缩小值与原断面面积比值的百分率,用 ψ 表示,其公式如下:

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

式中

ψ ——断面收缩率(%);

F_0 ——试样原来的断面面积(mm²);

F_1 ——试样拉断后的断面面积(mm²)。

材料的 δ 和 ψ 愈大,则表示其塑性愈好,即材料能承受较大的塑性变形而不被破坏。一般把 $\delta > 5\%$ 的材料称为塑性材料(如低碳钢),而把 $\delta < 5\%$ 的材料称为脆性材料(如灰口铸铁)。塑性好的材料可以顺利地进行某些成型工艺,如锻压、冷冲和冷拔、冷弯等。另外,良好的塑性使零件在使用时万一过载,也能由于塑性变形使材料强度提高,因而可避免突然断裂。

三、其它强度指标

(一) 抗弯强度

对于铸铁、铸造合金,工具钢及硬质合金等脆性材料来说,因为由它们制成的机件和刀具多在弯曲载荷下工作,应该用抗弯强度来评定其性能。所谓抗弯强度是指试样在位于两支承中间的集中载荷作用下,使其折断时,试样断裂弯矩与试样截面系数的比值。

即

$$\sigma_{bb} = M_b / W$$

σ_{bb} ——抗弯强度,兆帕;

M_b ——试样断裂弯矩,若为三点弯曲加载时,其值为 $P \cdot L/4$, L 为两支承点间的弯矩,米, P 为试样所承受的最大集中载荷,牛;

W ——试样截面系数,圆柱试样 $W = \pi d^3/32$, 矩形试样 $W = bh^2/6$;

不同牌号的铸铁其抗弯强度不同，约在280~540兆帕之间变化。

(二) 抗压强度

试样受压缩时，在破坏前所承受的最大压缩负荷对应之应力称为抗压强度，通常以 σ_{bc} 表示，单位是兆帕。计算公式为：

$$\sigma_{bc} = \frac{P_{bc}}{F}$$

式中： P_{bc} ——试样破坏前所承受的最大压缩负荷，牛，
 F ——试样横截面面积，米²。

四、硬度

硬度是指材料抵抗硬的物体压入其表面的能力。从本质上说，它并不是新的特殊性能，是反映材料抵抗局部塑性变形的能力，它在本质上与强度属于同一范畴，所以材料的硬度与强度之间有一定关系，根据硬度可以大致估计材料的抗拉强度。例如，

低碳钢： $\sigma_b = 3.6HB$ (布氏硬度)

高碳钢： $\sigma_b = 3.4HB$

调质合金钢： $\sigma_b = 3.25HB$

常用测定硬度的方法有：

(一) 布氏硬度

布氏硬度的测定方法是：以规定载荷为 P 的力把直径为 D 的钢球压入试样表面，并保持一定时间，然后卸除载荷，这样便在金属材料的表面留下了一个直径为 d 的压痕，如图1—2所示。此压痕单位面积上所承受的压力即为布氏硬度值，以符号HB表示，计算公式为：

$$HB = \frac{P}{F} = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

式中 HB ——布氏硬度 (公斤/毫米²)，
 P ——加在钢球上的载荷 (公斤)，
 F ——压痕表面积 (毫米²)，
 D ——钢球直径 (毫米)，
 d ——压痕直径 (毫米)。

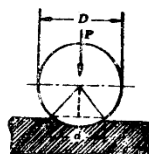


图 1—2 布氏硬度试验示意图

布氏硬度的单位为公斤/毫米²，但习惯上不标其单位，例如 $HB = 230$ 公斤/毫米² (叶片用2Cr13钢)可写为 $HB230$ 。布氏硬度值除可用上式计算而得外，还可直接根据压痕直径查表得出。

布氏硬度法测量金属材料硬度，其测量精度较高，试验数据稳定，但操作缓慢，压痕大，不宜作大量成品零件和硬度较高($HB > 450$)金属材料的测试。

电厂中还常应用锤击式简易布氏硬度计，它能直接在大型工件上测定硬度，且携带轻便。如图1—3所示。

(二) 洛氏硬度

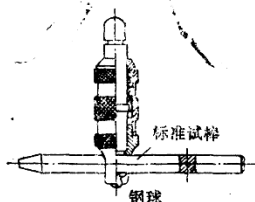


图 1—3 锤击式布氏硬度计

当金属材料的硬度超过HB450或者试样较小时，采用洛氏硬度试验来测定其硬度。

洛氏硬度试验是用一个顶角为 120° 的金刚石圆锥或直径为1.588毫米的淬火钢球，在一定压力下压入被试材料表面，然后根据压痕深度定出硬度数值。在实际测量时，可以从洛氏硬度试验机的刻度盘中直接读出硬度值，不用查表，也不用计算。压痕愈深，刻度盘指示的硬度数值愈

小，即材料愈软。压痕愈浅，刻度盘指示的硬度值愈大，即材料愈硬。

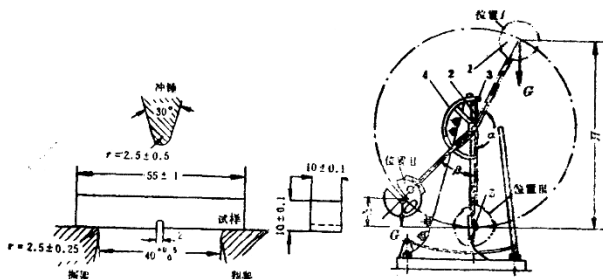
洛氏硬度试验由于压痕面积小，因而可用来测量成品的硬度，并且这种方法操作迅速简便，测量范围较广，因而得到广泛地应用。

五、韧性

在发电厂中，有些热力设备除受到拉伸，弯曲，扭转，剪切等作用外，还受到冲击作用，如汽包，转子等。金属材料的韧性就是指抵抗冲击负荷的能力。为了确定材料的冲击韧性，需要进行冲击试验。锅炉和汽轮机等设备的重要部件，在选择材料和设计时，都要考虑材料的韧性。

金属材料的冲击韧性的大小是在冲击试验机上通过冲击试验测定的。进行试验时，把规定尺寸和形状的标准试样放在机架上，把机器的摆锤升到规定的高度，然后松开摆锤，让它冲击试样，试样冲断后，摆锤继续升起，这样冲断试样所消耗的功（ A_K 值）直接由试验机上的标尺上读出，见图1—4。该冲击功除以试样缺口处的横截面积便得到冲击韧性值，即

$$a_K = \frac{A_K}{F}$$



摆锤式冲击试验机工作简图

图1—4 一次摆锤冲击试验的试样及装置

1—摆锤；2—指针；3—支座；4—标尺；5—试样位置

式中: a_K ——冲击韧性(焦耳/厘米², J/cm²);

A_K ——冲击功(焦耳, J);

F ——试样缺口处横截面积(厘米²)。

在电厂中, M65以下的螺栓要求 $a_K \geq 100 \text{ J/cm}^2$, M65—100要求 $a_K \geq 80 \text{ J/cm}^2$, M100以上要求 $a_K \geq 60 \text{ J/cm}^2$ 。对于汽缸主闸门螺栓要求 $a_K \leq 30 \text{ J/cm}^2$ 时, 对于调速器汽门螺栓 $a_K \leq 60 \text{ J/cm}^2$ 时则需要更换或作恢复性热处理。

一般来说, 钢材在某些温度下冲击韧性较高, 但是随着温度的下降, 冲击韧性明显降低, 工程上把冲击韧性显著下降时的温度称为脆性转变温度。金属材料的工作温度低于这个温度时, 发生脆性破坏的可能性增大了。脆性转变温度与材料中的合金元素种类有关, 特别是与材料的组织有关。它是汽轮机转子的特性之一, 低中强钢的脆性转变温度较高, 而高强度钢的脆性转变温度往往很低。在汽轮机启动过程中, 要通过暖机等措施尽快把转子温度提高到脆性转变温度以上, 以增加转子承受较大的离心力和热应力的能力。近年来, 采用盘车的办法预热, 待转子温度达到脆性转变温度以上(如150℃)时再冲动转子, 这样不但使转子温度均匀, 热应力下降, 而且转子中心孔温度也达到脆性转变温度以上。

钢中的非金属夹杂物越多, 其韧性就越差, 特别是氢, 对韧性有很大影响。氢可造成所谓氢脆, 使钢的塑性和韧性大大下降。它可以在钢内部形成许多微裂纹, 这些裂纹在断口上表现为光亮的白色斑点, 称为氢致“白点”, 这种现象在高强度Ni—Cr钢中(如汽轮机转子)最为明显。因此, 必须严格控制钢中非金属夹杂物的含量, 特别是氢的含量。

六、疲劳和疲劳极限、热疲劳和热冲击

有很多零件如各种轴, 齿轮、弹簧等, 汽轮机的主轴, 叶片等, 经常受到大小及方向变化的交变载荷。这种交变载荷常常会使金属材料在小于其强度极限的长期作用下断裂。这种现象叫做金属的疲劳。它的破坏特点是突然的。汽轮机的轴及叶片等零件的破坏, 以疲劳失效为最多。

显然, 材料所承受的交变载荷愈大, 材料的寿命愈短, 反之, 则愈长。当应力值降至某一值时, 材料可经受无限次的循环而不断裂。金属材料在长期(无限次)经受交变载荷作用下, 不致引起断裂的最大应力, 称为疲劳极限, 用它来衡量金属材料的耐疲劳性能。

实际上, 不可能让材料经受无限次的循环, 所以生产上把能经受 $10^6 \sim 10^7$ 次的循环而不断裂的最大应力作为疲劳极限。当交变应力循环对称时, 用符号 σ_{-1} 表示。单位为兆帕。

金属材料的疲劳强度与很多因素有关, 如合金成分, 表面质量, 组织结构, 夹杂物的多少与分布等。如果对表面进行强化处理, 如表面喷丸、辗压、表面淬火等, 也能提高材料的疲劳强度。此外, 在酸、碱、盐的水溶液等腐蚀介质中工作的金属材料, 会使疲劳强度下降。

锅炉、汽轮机中的某些零件, 在反复加热和冷却的作用下, 在其内部会产生交变热应力, 由于热应力反复作用而产生的破坏称为热疲劳。

热应力的产生是由于温度变化引起材料的变形（膨胀和收缩），如果这种变形受到约束，则在物体内就会产生应力，这种应力称为热应力。物体由于热膨胀受到约束，会产生压缩应力；反之如果物体受到冷却，物体收缩时同样受到约束，这时物体内将产生拉伸热应力。所以引起热应力的根本原因是在温度变化时物体变形受到约束引起的。

汽轮机在启停过程中，零部件主要受到交变热应力，经过一定数量的热应力循环就会出现疲劳裂纹，这些裂纹易出现在应力集中的部位，如零件的圆角，小孔，键槽等地方。

如果金属材料受到急剧的加热或冷却，在材料内部会引起很大的冲击热应力，这种现象称为热冲击。它比热疲劳承受的热应力大的多，有时即使一次热冲击就会使零件损坏。而热疲劳则是在较低应力状态下经过多次交变应力的反复作用而使材料破坏的。汽轮机在启停和工况变化时，应当防止汽缸、转子等部件受到热冲击。

七、减振性

金属材料通过内摩擦（内耗）吸收振动能并把它转变为热能的能力叫减振性。

减振性的高低，通常以对数振动衰减率 δ 值的大小来表示

$$\delta = \frac{\ln a_1 - \ln a_n}{n - 1}$$

式中

a_1 ——起始振幅；

a_n ——经过 n 次振动后的振幅。

对数振动衰减率与振动应力及温度有关。一般，提高温度，钢和合金的振动衰减率亦提高；应力加大，则 δ 值亦增加。

当叶片的 δ 值大时，则减振性能好。12%Cr型马氏体钢具有较好的减振性，它的 δ 值可达0.025或更高，为奥氏体钢的五至十倍。这也是叶片材料广泛采用这类钢的原因之一。但是防止叶片断裂的主要方面还是使叶片的自然频率避开共振区，否则减振性再好的材料也会发生断裂的。

八、缺口敏感性

缺口敏感性是指在带有一定应力集中的缺口条件下，材料抵抗裂纹扩展的能力，属于材料韧性范围。但它和材料的冲击韧性不同，是在静载荷下抗裂纹扩展的性能，而冲击韧性是指材料承受动载荷时抵抗裂纹扩展的能力。

某些紧固件材料在较低温度和较短试验时间内不呈现缺口敏感性，而在较高温度和较长时间内却表现出有缺口敏感性，说明缺口敏感性随试验时间和温度而变化。因此，全面评价材料是否有缺口敏感性，必须选几个温度并做较长时间（通常100—1000小时）的试验，比较带缺口试样及光滑试样的持久强度，画出各组曲线进行判断。

第二章 铁 碳 合 金

第一节 金属的组织结构

让我们以钢铁为例来说明金属的组织结构。

钢铁的内部组织结构只有在显微镜下才能看到。在显微镜下所看到的钢铁内部组织结构称为显微组织或金相组织。那么，当我们用显微镜去观察钢铁的显微组织时，将会看到些什么呢？原来这些钢铁是由许多微小的颗粒组成的，这些小颗粒叫“晶粒”，它们的交界处叫“晶界”，图2—1就是纯铁的显微组织，其中的“晶粒”和“晶界”可以看得十分清楚，通常钢铁材料的晶粒大小约在0.05~5毫米之间，比较大的晶粒，在钢铁材料的断口处，用肉眼也可以看到，如白口铸铁的断口晶粒。

从我们过去所学过的物理和化学知识知道，任何物质都是由原子组成的，如果这些原子又按照一定规则排列着，那么这种物质就称为“晶体”。我们在显微镜下看到的“晶粒”，就是这种原子按一定规则排列的“晶体”小颗粒。

晶体内部的原子有规律地排列着，但是，对于不同的物质，原子可以按不同形式有规则的排列。

为了便于研究各个晶体中原子的排列形式，我们把晶体的每个原子用其中心的一个



图 2—1 铁素体的显微组织

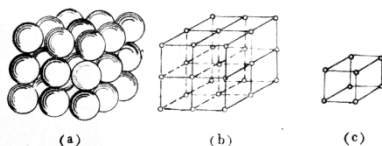


图 2—2 简单立方晶格

(a)晶体中金属原子的排列；(b)金属的晶格；(c)晶胞