

工程材料

饶孝权 主编

中央广播电视大学出版社

前 言

本书是根据1988年4月审定通过的“中央广播电视大学工程材料教学大纲”而编写的，只在编排顺序和个别章节上作了些调整。本教材适于用作广播电视大学、专科学校、职工大学和业余大学机械制造类专业学员学习工程材料的教材，亦可作为全日制高等院校机械制造类专业的教学参考书。

机械制造类专业开设“工程材料”课程的目的是为了使学员学习和掌握选择材料和使用材料的知识。本教材突出了结合零件的性能要求合理地选择材料和加工工艺这一主题，有助于学以致用和理论联系实际。例如本书的第十章比较系统、简要地介绍了零件的失效分析和材料选择，以期作为全书的总结和综合。此外，本教材有意识地将金属材料和非金属材料作为一个整体来介绍，以成分、结构、性能这一条主线将二者结合在一起。

本书统一使用国家最新颁布的有关工程材料标准。还适当反映了近年来在材料科学与工程方面的新成果。

本书第一、二、三章由姚家鑫同志编写，第四、七、八章由李善有同志编写，第五、六、十章由饶孝权同志编写，第九章由李鸿珠同志编写。全书由饶孝权同志主编，龚方岳同志主审。

作 者 1990.2

目 录

绪 论	(1)
第一章 材料的机械性能	(2)
第一节 材料承受静载荷时的机械性能	(2)
第二节 材料承受动载荷时的机械性能	(6)
第三节 材料承受变载荷时的机械性能	(7)
第四节 材料的断裂韧性	(8)
第五节 材料的蠕变	(9)
第六节 材料的摩擦与磨损	(9)
第二章 工程材料的结构及凝固	(12)
第一节 工程材料的晶体结构	(12)
第二节 非晶态结构和高聚物结构特点	(23)
第三节 凝固与结晶	(24)
第三章 金属的塑性变形和再结晶	(30)
第一节 金属的塑性变形	(30)
第二节 塑性变形对金属组织和性能的影响	(35)
第三节 冷变形金属在加热时组织和性能的变化	(37)
第四节 金属的热加工	(40)
第四章 二元合金	(42)
第一节 合金的基本概念	(42)
第二节 二元合金相图	(46)
第三节 合金性能与相图的关系	(53)
第五章 铁碳合金	(55)
第一节 铁碳合金相图	(55)
第二节 碳钢	(64)
第三节 铸铁	(68)
第六章 钢的热处理	(79)
第一节 钢在加热时的转变	(79)
第二节 钢在冷却时的转变	(81)
第三节 退火和正火	(86)
第四节 淬火	(88)
第五节 回火	(92)
第六节 表面淬火	(94)
第七节 化学热处理	(96)

第八节 热处理技术条件的标注	(99)
第七章 合金钢	(102)
第一节 概述	(102)
第二节 合金元素在钢中的作用	(103)
第三节 合金结构钢	(109)
第四节 合金工具钢	(120)
第五节 特殊性能钢	(127)
第八章 有色金属及其合金	(135)
第一节 铝及铝合金	(135)
第二节 铜及铜合金	(142)
第三节 轴承合金	(147)
第九章 非金属材料	(151)
第一节 高分子材料	(151)
第二节 陶瓷材料	(176)
第三节 复合材料	(185)
第十章 零件的失效分析和材料选择	(191)
第一节 零件的失效分析	(191)
第二节 材料选择的一般原则	(194)
第三节 热处理零件的结构工艺性	(206)
第四节 典型零件的材料选择和工艺分析	(210)
附录一 美、英、日、联邦德国的钢号表示法	(227)
附录二 国内外常用钢号对照表	(233)
附录三 结构钢按坯料截面与屈服强度选用钢种参考表	(235)

绪 论

材料、能源和信息是现代新技术革命的三大支柱。由于飞跃发展的当代科学技术对材料提出了更多和更高的要求,从而促进了常规材料的发展和大批新型结构材料和功能材料的产生。据不完全统计,目前材料品种已达25万之多,各有其独特的性能和用途。而且,各种材料相互配合使用。比如,以金属为基加上陶瓷等无机物纤维成为具有优异性能的金属基复合材料;或以聚合物为基加上无机物纤维成为有机复合材料。材料之间又相互代用,如在高温下以陶瓷代替金属;为减轻重量,以塑料等聚合物代替金属等。

尽管材料的品种繁多,性能各异,但对它们的研究仍有相同或相似的理论 and 规律可循。如相图、相变原理和断裂原理,晶体生长、晶体缺陷、晶界和相界、形变和再结晶等规律,不仅普遍用于晶体材料,也可用于非晶体材料。当然各类材料还有其独特规律。如高分子材料既可形成完全无序排列的非晶态结构,也可转变为部分分子有序排列,形成部分晶态结构。我们既要学习各类材料的共同规律,也要掌握各自的特殊规律。

机械制造工作者为什么要学习材料知识呢?对于一个机械产品,人们总是力求其功能优异、结构紧凑、质量稳定、安全可靠、价格低廉。这就需要高水平的设计,合理的加工和正确使用三者密切配合。这三个环节都要涉及到许多材料问题。

机械设计包括结构设计和材料设计两个方面,缺一不可。正确选择材料与确定合理的技术要求,使零件既能满足使用和加工的性能要求,又能充分发挥材料潜力,提高经济效益,是一个细致、复杂又必须解决的问题。不仅要机械零件的服役条件、受力状况、结构形状、加工方法及生产成本等有全面的综合分析,而且还需要掌握材料成分、组织、性能及其变化规律,并能运用客观规律,去具体地解决材料选择与合理使用的实际问题。

机械设计者需要根据零件的服役条件,提出对材料的性能要求,确定选用什么材料,怎样处理,获得什么组织才能满足零件的性能要求。材料设计实质上是“零件内部结构设计”,是保证产品内在质量的关键。若因设计者材料知识不足,盲目套用相似零件的材料选择,停留在经验设计水平上,往往会给产品的加工和使用留下隐患,导致零件早期失效,甚至造成重大事故。因此,机械制造类专业设置“工程材料”作为一门必修的技术基础课程。它以物理、化学、材料力学、金属工艺学等课程为基础;又为机械零件、刀具、机械制造工艺学等后续课程作准备。

第一章 材料的机械性能

设计师必须熟悉零件的服役条件，其中包括工作原理、载荷性质、工作温度、工作环境等。根据这些条件对零件选材提出恰如其分的使用性能要求，并根据生产批量考虑其加工工艺。所谓使用性能，包括机械性能、物理性能和化学稳定性。

在选择和应用材料时，首先应着眼于材料的使用性能。本章重点讨论工程材料的机械性能。

材料的机械性能是材料在承受各种载荷时的行为。它关系到工件在使用过程中传递力的能力和使用寿命，也关系到材料加工的难易程度。当材料受外力作用时，一般会出现弹性变形、塑性变形和断裂三个过程。根据载荷性质的不同（如拉伸、压缩、冲击等），这些过程的发生和发展是不同的；评价材料机械性能的指标也有其特定的物理意义。下面将按照外加载荷的类型进行分类讨论。

第一节 材料承受静载荷时的机械性能

所谓静载荷是指对试样缓慢加载。最常用的静载试验有拉伸、压缩、硬度、弯曲、扭转试验等。利用这些不同类型的试验，可以测得材料各种性质的机械性能指标，如拉伸强度、硬度和弯曲强度等等。这里仅讨论应用较广泛的静拉伸和硬度试验。

一、静拉伸试验

静拉伸试验是应用最广泛的机械性能试验方法之一。在标准试样两端缓慢地施加拉伸载荷，试样的工作部分受轴向拉应力 σ 作用，产生轴向应变 ε 。随应力加大，应变也相应增加，直至断裂。可以把拉伸过程中相应的 σ 和 ε 值绘成应力-应变曲线。图1-1为几类材料拉伸时的应力-应变曲线。

图1-2为低碳钢的应力-应变曲线。可以从曲线中读出其常规的机械性能指标。

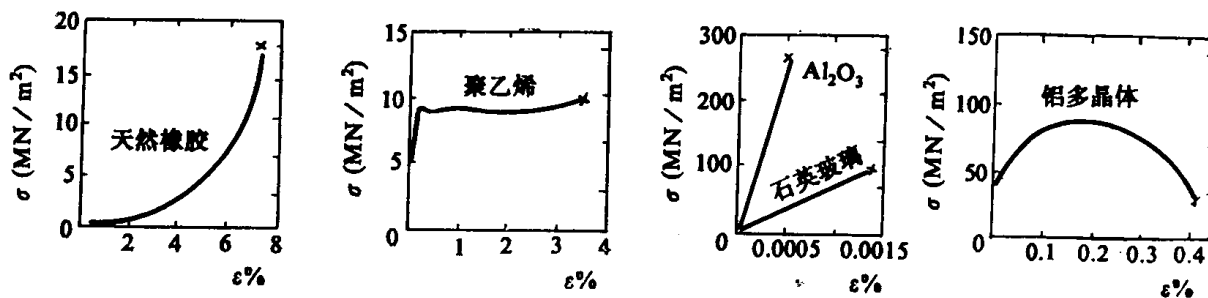


图 1-1 几类材料拉伸时的 σ - ε 曲线

(一) 弹性和刚度

在图1-2中曲线的 e 点以前,若卸去载荷,试样能恢复原状。材料这种不产生永久变形的能力称为弹性。 e 点对应的应力值称为弹性极限 σ_e ,单位为 MN/m^2 。 σ_e 是材料不产生永久变形时所能承受的最大应力。

图中 oe 是直线,这表示在弹性变形阶段,应力与应变成正比关系,即服从胡克定律。 oe 直线的斜率是试样材料的弹性模量 E

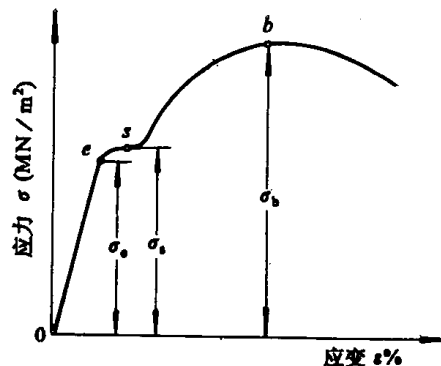


图 1-2 低碳钢的 σ - ϵ 曲线

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

弹性模量 E 值表征材料产生弹性变形的难易程度。弹性模量越大说明产生一定量弹性变形的应力值越大。零件的刚度与弹性模量成正比。从这个意义上讲,也可以认为弹性模量 E 代表材料刚度的大小。刚度越大则材料在一定应力下产生的弹性变形越小。有些机械零件要严格控制其弹性变形量,如机床主轴等要有足够的刚度以保证其工作精度。

弹性模量是材料机械性能指标中最稳定的一个,它对材料的组织状态和外界条件的变化不敏感,主要与材料的种类及成分有关。表1-1列出了常用工程材料的弹性模量及熔点和键型。各种材料的弹性模量值差别很大。这主要是由于不同材料具有不同的结合键和键能。具

表1-1 常用工程材料的弹性模量、熔点及其键型

材 料	弹 性 模 量 E (10MPa)	熔 点 T_m ($^{\circ}\text{C}$)	键 型
铁及低碳钢	20700	~ 1538	金属键
Cu	12100	1084	金属键
Al	6900	660	金属键
W	41000	3387	金属键
金刚石	114000	> 3800	共价键
Al_2O_3	40000	2050	共价键和离子键
石英玻璃	7000	$T_g \sim 1150$	共价键和离子键
电木	500	—	共价键
硬橡胶	400	—	共价键
无规聚苯乙烯	300	$T_g \sim 100$	范氏力
支化聚乙烯	20	$T_g \sim 137$	范氏力
铸铁	$(17.3 \sim 19.4) \times 10^3$		金属键
低合金钢	$(20.4 \sim 21) \times 10^3$		金属键
奥氏体不锈钢	$(19.4 \sim 20.4) \times 10^3$		金属键
碳纤维增强树脂	$(7 \sim 20) \times 10^3$		
玻璃纤维增强树脂	$(0.7 \sim 4.6) \times 10^3$		

有强化学键结合的材料，弹性模量高；而分子间仅有范氏力结合的材料，其弹性模量很小。所以弹性模量 E 值取决于固体中粒子间的键合强度。

(二) 强度

在外力作用下，材料抵抗变形和断裂的能力称为强度。当试样承受拉力时，强度特性的指标主要是屈服强度和抗拉强度。

1. 屈服强度 在图1-2中曲线上 s 点处出现的水平线段，表明应力虽不再增加，应变却仍在增加，这种变形是一种塑性流变，它产生不可逆的永久变形，即外载荷卸去，试样不能全部恢复，将保留一部分残余变形。 s 点是材料从弹性变形阶段过渡到塑性变形阶段的临界点。材料在外力作用下开始发生塑性变形的最低应力值称为屈服极限或屈服强度 σ_s 。单位为 MN/m^2 。

有些材料的拉伸曲线没有明显的屈服点，工程上规定试样产生0.2%残余伸长时的应力值为该材料的条件屈服强度。用 $\sigma_{0.2}$ 表示。

机器零件和构件在服役时一般不允许发生塑性变形，所以屈服强度是评定材料承载能力的重要的机械性能指标。

2. 抗拉强度 抗拉强度为试样被拉断前的最大承载应力。图1-2上的 σ_b 即为抗拉强度又叫强度极限。 $\sigma_b = P_B / F_0$ 。抗拉强度为试样最大承受载荷 P_B 除以试样原始截面积 F_0 。表1-2列出了一些典型工程材料的抗拉强度值。

表1-2 常用工程材料的抗拉强度

材 料	抗 拉 强 度 σ_b MN/m^2
铝合金	100~500
铜合金	200~1300
灰口铸铁	150~400
中碳钢	350~500
铁素体不锈钢	500~600
马氏体不锈钢	450~1300
聚乙烯	8~16
尼龙6	70~90
聚氯乙烯	52~58
聚苯乙烯	35~60

屈服强度与抗拉强度的比值在工程上称为屈强比。屈强比越小，工程构件的可靠性越高，说明即使外载或某些意外因素使材料屈服，也不至于立即断裂。屈强比过小时，材料强度的有效利用率太低。

(三) 延伸率和断面收缩率 断裂前材料发生塑性变形的能力叫做塑性。塑性以材料断裂后塑性变形的大小来表达。拉伸时延伸率 δ 和断面收缩率 ψ 表示材料的塑性。 δ 和 ψ 均无量纲。

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

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

式中 L_1 ——试样拉断后的长度；
 F_1 ——试样拉断处的截面积；
 L_0 ——试样的原始长度（工作部分长度、即标距）；
 F_0 ——试样的原始截面积。

延伸率表示试样拉伸后的相对伸长量；断面收缩率表示试样断裂后截面的相对收缩值。两者皆为材料的塑性指标。 δ 值和 ψ 值越大，材料的塑性越好。其中以 ψ 值更接近真实应变。

二、硬度试验

硬度是指材料表面抵抗塑性变形的能力。硬度值的物理意义随试验方法的不同而不同。在应用最广泛的压入法硬度试验中，硬度为材料表面抵抗其它物体压入的能力。工程上常用的有布氏硬度和洛氏硬度等。

（一）布氏硬度

布氏硬度试验是用一定的载荷 P ，将直径为 D 的圆球压入被测材料的表面，保持一定时间后卸除载荷，以载荷 P 与压痕表面积 F 的比值，作为布氏硬度值，用HB表示。布氏硬度的单位 kgf/mm^2 ，但一般不标注。

布氏硬度试验的优点是，压痕面积大，不受微小不均匀硬度的影响，试验数据稳定，数据重复性好。但当压头为淬火钢球时，不能测试太硬的材料，一般适宜于测试布氏硬度在450以下的材料。当压头为硬质合金球时，可测量HB650以下的材料。布氏硬度试验通常用于铸铁、有色金属、结构钢以及非金属材料等，应用范围很广。

（二）洛氏硬度

洛氏硬度试验是将标准压头用规定压力压入试样表面，用其压入深度作为硬度的量度。为了增宽硬度测量范围，采用了不同的压头和载荷组成各种不同洛氏硬度标尺。每种标尺用一个字母在HR字样后加以注明，以作区别。如HRA、HRB、HRC等。

洛氏硬度的优点是操作简便、不损伤试样、可测定的硬度范围广；缺点是因压痕较小、易受试样微小区域不均匀的影响、重复性也差。洛氏硬度试验的应用范围很广，只需采用不同压头和载荷的组合，即可测定淬火钢、有色金属及工程塑料等材料的硬度。表1-3是一些典型工程材料的硬度值。

由于材料的要求不同，除布氏、洛氏硬度之外，还有许多其它类型的硬度试验方法，例如，属于压入法的维氏硬度、努氏硬度试验，属于划痕法的莫氏硬度试验，以及动载的肖氏硬度试验等，可以根据具体情况来选用。

表1-3 几种工程材料的硬度

材 料	硬 度 值
退火态工业纯铝	HB21
灰口铸铁	HB210
白口铸铁	HB400
正火态20钢	HB150
退火态奥氏体不锈钢	HB150
聚氯乙烯	HRR110
聚苯乙烯	HRM80
ABS塑料	HRM70
尼龙6	HRM110

金属材料的硬度是由塑性变形抗力决定的，所以硬度值和强度值之间有某种近似的对应关系。以下经验关系可作为工程上的参考：低碳钢 $\sigma_b \approx 0.36\text{HB}$ ，高碳钢 $\sigma_b \approx 0.34\text{HB}$ ，调质合金钢 $\sigma_b \approx 0.325\text{HB}$ ，灰口铸铁 $\sigma_b \approx 0.1\text{HB}$ 。

第二节 材料承受动载荷时的机械性能

许多机械零件是在动载条件下工作的，即载荷以较高的速度施加到零件上。一般说来，随加载速度的增加，材料的塑性下降，脆性增大。所以，对于动载作用下工作的零件，不能简单地用静载机械性能指标来衡量。

在工程上，冲击载荷是一类重要的动载荷形式，载荷是突然加到构件上的。所以常用一次摆锤冲击带缺口试样的弯曲试验来测定金属抗冲击载荷的能力，即测定冲击载荷试样使折断而消耗的功 A_K ，单位为焦耳。而用试样缺口处的截面积 F 去除 A_K ，可得到材料的冲击值 $a_K = A_K/F$ 其单位为 kJ/m^2 (或 J/cm^2)。

材料由缺口冲击弯曲试验所得到的试验值称为缺口冲击韧性也称作冲击值。它代表指定温度下，材料在缺口和冲击加载速度共同作用下的脆化趋势及程度，或者说对缺口的敏感度。

缺口冲击韧性的大小除了取决于材料本身以外，还受环境温度、试样尺寸、缺口形状和加载速度等因素的影响。所以，在分析冲击试验的结果时，一定要注意试验条件及试样的型式。不同型式试样的冲击值，不能相互换算和直接比较。对于工具钢等脆性材料，可采用无缺口冲击试样。

由于冲击试验时加载速度大，试样又带有缺口，故冲击韧性能灵敏地反映金属在冶金和热处理等方面的质量问题，是鉴定材料质量和设计选材时重要的性能依据之一。

除了这种一次冲击弯曲试验外，还有冲击拉伸试验，冲击扭转试验等，均可用来测定材

料的动态韧性。具体选用什么试验方法，取决于工件在工作中受力的特点。

对于工程塑料、木材等非金属材料同样也可以作冲击试验，测定其冲击值。不过试验规范应有所不同。表1-4给出了一些典型工程材料的冲击值。

表1-4 几种工程材料的冲击值

材 料	冲击值或冲击功	试 样
退火态工业纯铝	冲击功 30J	Charpy V型试样 缺口尖端半径0.25mm 缺口深度2.75mm
退火态黑心可锻铸铁	15J	
灰口铸铁	3J	
退火态奥氏体不锈钢	217J	
热轧20钢	50J	
高密度聚乙烯	冲击值 30KJ/m ²	
聚氯乙烯	3KJ/m ²	
尼龙66	5KJ/m ²	
聚苯乙烯	2KJ/m ²	
ABS塑料	25KJ/m ²	

第三节 材料承受变载荷时的机械性能

有一类动载荷，它的大小和方向作周期性的变化，即所谓交变载荷(循环载荷)。最简单的交变载荷如图1-3所示。

零件受交变载荷作用时，即使工作应力低于屈服强度，但经一定循环周次后仍能发生断裂。交变应力和断裂循环周次之间的关系，通常用疲劳曲线（即 S-N 曲线）来描述，如图1-4所示。

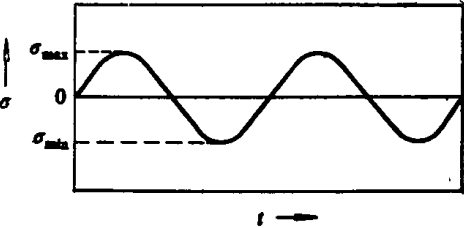


图 1-3 交变载荷示意图

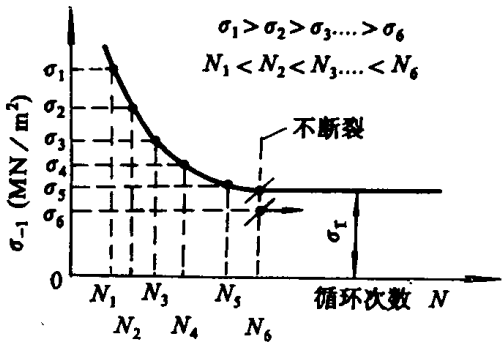


图 1-4 疲劳曲线示意图

疲劳曲线表明，当应力低于某一值时，循环周次到无限也不发生断裂，此值称为疲劳强度或疲劳极限。光滑试样的对称弯曲疲劳极限用 σ_{-1} 表示，单位为 MN/m^2 ，角码 - 1 表示最小应力与最大应力的比值。由于实际上不可能进行无数周次试验，而且有的材料不出现图 1-4

所示之趋于水平线的疲劳曲线,所以,一般规定一个应力循环基数,超过这个基数就认为该材料不再发生疲劳破坏。钢材的循环基数为 10^7 ,有色金属和某些超高强度钢的循环基数为 10^8 。

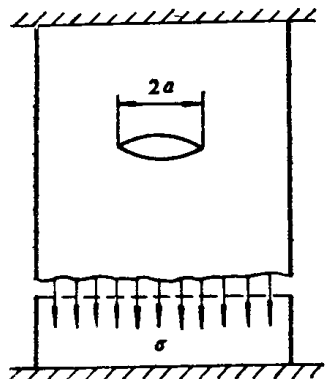


图 1-5 具有张开裂纹的试样

第四节 材料的断裂韧性

前面所讨论的材料机械性能都有一个前提,即假定材料的内部是完整的、连续的。但是,实际材料不可避免地存在着各种缺陷。例如,夹杂物,气孔等冶金缺陷或是在使用和加工过程中产生的机械缺陷。这些缺陷都破坏了材料的连续性,实际上成为材料中的裂纹。最典型的裂纹如图 1-5 所示。由于裂纹的存在,材料中的应力分布不再能看作是均匀的。在裂纹尖端前沿产生了应力集中,且具有特殊的分布,形成了一个裂纹尖端的应力场。按照断裂力学的观点分析,对于张开型裂纹(通常称之为 I 型裂纹),其大小可以用应力强度因子 K_I 来描述。 K_I 与加载方式、试样几何尺寸、材料特性、裂纹形状和大小有关,可表达为:

$$K_I = Y\sigma\sqrt{a} \quad (\text{MN}/\text{m}^{3/2})$$

式中, Y ——与裂纹形状,加载方式及试样几何尺寸有关的系数;

σ ——外加的名义应力,单位为 MN/m^2 ;

a ——裂纹的半长,单位为 m 。

对一个有裂纹的试样施加拉伸载荷时,其 Y 值是一定的。当拉力 σ 逐渐增大,或者是裂纹长度 $2a$ 逐渐扩展时,裂纹尖端的应力强度因子 K_I 也随之逐渐增大。当 K_I 增大到某一定值时,就能使裂纹前沿某一区域的内应力大到足以使裂纹产生突然的失稳扩展,即发生脆断。这个强度因子的临界值,称为材料的断裂韧性,用 K_{Ic} 表示。它反映了材料有裂纹存在时,抵抗脆性断裂的能力。由 K_I 和 K_{Ic} 这两个量的相对大小,可以判定带裂纹的材料是否会发生失稳脆断。当 $K_I > K_{Ic}$ 时,裂纹失稳扩展,发生脆断;当 $K_I < K_{Ic}$ 时,裂纹不扩展或扩展很慢,不发生快速脆断;当 $K_I = K_{Ic}$ 时,裂纹处于临界状态。

必须强调指出, K_I 和 K_{Ic} 虽然有密切的联系,但两者的物理意义是截然不同的。 K_I 是描述裂纹尖端应力场大小的力学参量,它与裂纹、物体的形状、大小及外加应力等参数都有关系。而断裂韧性 K_{Ic} 是评定材料阻止裂纹失稳扩展能力的机械性能指标,可通过试验来测定。它与裂纹本身的大小、形状无关,也和外加应力无关,是材料本身的特性,只和材料的成分、热处理及加工工艺等有关。

应力强度因子和断裂韧性的提出,在工程上有重要的实际意义。例如,用试验测定材料的断裂韧性 K_{Ic} ,再根据无损探伤测出构件中的最大裂纹长度,就可以算出使裂纹失稳扩展的

临界载荷，即构件所能承受的最大载荷。或者若已知材料的断裂韧性 K_{IC} ，根据构件实际所受的外加应力，可以确定构件中允许存在的最大裂纹长度。所以，断裂韧性为安全设计提供了一个重要的机械性能指标，尤其在疲劳、冲击、高低温强度、应力腐蚀、辐照损伤等强度领域得到了广泛的应用。同时也为发展新材料、新工艺及合理选材提出了方向。

第五节 材料的蠕变

蠕变是在一定外力作用下，随着时间的延长材料的变形不断发展，直至断裂的现象。材料的蠕变现象在工程上是经常遇到的。如用环氧树脂粘结的管道，长时间工作后在管道接口处的破断；聚合物轴承长时间工作后产生过大的间隙；加热炉内的夹具，挂钩等的失效断裂等等。这些问题往往不是由于载荷过大造成的，而是温度和时间对塑性变形的影响造成的。不是材料发生了蠕变。因此，对于高温下工作的金属材料及常温下工作的聚合物，对其蠕变应予特别的重视。

抗蠕变性能是用来评定材料在持续载荷下抵抗塑性变形的能力，金属蠕变强度常以1000小时内产生0.1%应变所需的应力来表示。指出蠕变强度值时还必须指明其试验温度。因此蠕变强度是一个条件应力值。如700℃下工作1000小时产生0.1%应变的应力值，用 $\sigma_{0.1/1000}^{700}$ 表示其蠕变极限值。聚合物则常采用给定应力下的总变形百分数据。

不同材料产生蠕变的条件不同。对于金属材料，当其温度高于 $(0.3\sim 0.4)T_m$ （ T_m 表示材料熔点的绝对温度）时，可产生明显的蠕变；陶瓷材料则在高于 $(0.4\sim 0.5)T_m$ 时也会产生蠕变；高分子材料发生蠕变的温度与其玻璃化温度 T_g 有关，许多高聚物在室温下就有明显的蠕变现象。

对于所有材料来说，提高温度或加大应力都会增加它们的蠕变速度或缩短断裂时间。在蠕变过程中，开始很快产生屈服，然后以恒定的变形速度维持较长时间，最后屈服重新加快而产生超量的塑性变形或断裂而失效。

对于在使用中不考虑变形量大小而只要求在一定应力下具有一定使用寿命的零部件（如锅炉钢管）常规定另一个性能指标：持久强度。持久强度为试样在一定温度下，经过一定时间发生断裂的应力值。例如 $\sigma_{10^5}^{500}$ 表示试样在500℃下经过 10^5 小时发生断裂的应力值。

第六节 材料的摩擦与磨损

机器在运转时，机件之间的相对运动如轴与轴承、活塞与汽缸套、齿轮与齿轮之间会发生摩擦。在摩擦作用下发生一系列的机械、物理、化学的相互作用，以致机件表面发生尺寸变化和物质消耗，这种现象称之为磨损。

磨损超过容许值将使机器精度下降、功率不足、零件断裂，致使机器需要大修或报废。

一、摩擦的概念与类型

两个相互接触的物体或物体与介质间相对运动时出现的阻碍作用称为摩擦。

根据运动状态，摩擦可分为静摩擦及动摩擦。动摩擦又可分为滑动摩擦及滚动摩擦。物体由静止而开始运动时所需克服的摩擦力称为静摩擦力。在运动状态下，为保持匀速运动所需要克服的摩擦力称为动摩擦力。动摩擦力作的功有75%转变为热能，25%消耗在表层塑性变形。滚动摩擦要比滑动摩擦小得多，仅有其几十分之一。

根据润滑状态，摩擦又可分为：有润滑摩擦及干摩擦。其中干摩擦的磨损最为严重。

二、磨损的类型及耐磨性测定

磨损是摩擦的必然结果。为了对比不同材料的磨损特性，可采用磨损量或磨损量的倒数——耐磨性来表示，也可采用相对耐磨性 ε 来表示。

$$\varepsilon = \frac{\text{被测试样磨损量}}{\text{标准试样磨损量}}$$

磨损量用失重法或尺寸法表示。失重法就是用重量减少表示磨损量。如以 $\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot 1000\text{m}$ 表示在1000m摩擦行程上每 cm^2 面积的失重是多少mg。尺寸法是用长度或体积的变化表示磨损量其中最方便的是用沿法线方向的尺寸减少（线磨损量）来表示。通常磨损量与摩擦行程（即时间）的关系曲线如图1-6所示。

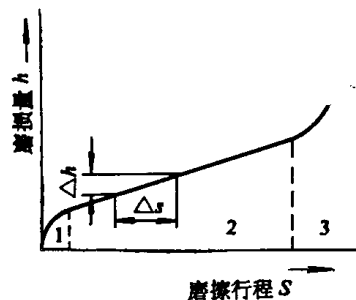


图 1-6 磨损曲线

曲线可分为跑合期 1、稳定磨损阶段 2 及磨损加速阶段 3。若在 Δt 时间内摩擦行程为 Δs ，此时线磨损量为 Δh ，单位行程磨损量（即 $\frac{\Delta h}{\Delta s}$ ）称为线磨损，线磨损的倒数即耐磨性。

按磨损的机制，磨损主要分为五类，即氧化磨损、咬合磨损、热磨损、磨粒磨损及表面疲劳磨损（即接触疲劳）。表1-6概括了这几类磨损的特征。

表1-6 磨 损 分 类

磨损分类	负 荷 特 征	介质情况	磨损过程表面情况	表面破坏特征	举 例
氧化磨损	滑动或滚动 在各种大小比压下 和滑动速度下	无论有无 润滑	塑变同时, 氧化 膜不断形成和破 坏, 不断有氧化物 自表面剥脱	磨损速度小, $0.1 \sim 0.5 \mu\text{m/h}$, 表面光亮有均匀 分布的极细磨纹	为一般机 械中最常见 的正常磨损
咬合磨损	滑动时 在大的比压(超过 屈服点)和小的滑动 速度下(对钢: $V < 1$ m/s)	无润滑和 缺乏氧化膜 情况下	摩擦点处金属直 接粘着, 随后粘着 点破坏, 有磨粒脱 下, 即粘着点不断 形成和破坏	磨损速度最大 $10 \sim 15 \mu\text{m/h}$, 表 面有严重擦伤痕	缺润滑的 低速重载机 械
热 磨 损	滑动时 在很大的比压和大 的滑动速度下(对钢: $V > 3 \sim 4 \text{m/s}$)	无论有无 润滑	因摩擦热表面温 度升高, 使金属软 化, 润滑剂变质, 发生金属粘着和撕 裂。	磨损速度大, $\sim 5 \mu\text{m/h}$, 表面 布满撕裂划痕	高速重载 机械
磨粒磨损	滑动时 在各种大小比压和 滑动速度下	无论有无 润滑 当存在有 硬质磨粒时	磨粒嵌入表面或 被磨粒切削	磨损速度大, $0.5 \sim 5 \mu\text{m/h}$, 表 面有均匀的磨粒 切割纹	矿山机械 农业机械
表面疲劳 磨损(接触 疲劳)	滚动时或重复接触 时 比压超过摩擦点处 屈服极限	无论有无 润滑	经过一定周次重 复加载后, 表面产 生麻点状剥落	表面呈麻点状 剥落	滚 动 轴 承; 齿轴

第二章 工程材料的结构及凝固

在一定的外界条件下,材料的性能取决于材料的组织结构。材料的组织结构除了与其成分有关外,还受其形成条件的影响。所以研究材料的组织结构,控制其形成条件,对于生产、加工、使用现有材料和发展新型材料均具有重要的意义。

工程材料包括金属、陶瓷和高聚物等材料。按内部原子(或分子)排列特征可分为晶体和非晶体。常用的金属及其合金、大多数陶瓷和矿物以及部分高聚物均为晶体。晶体结构的基本特征是原子在三维空间呈周期性的规则排列,即存在着长程的几何有序。玻璃及许多高聚物呈非晶态,它们内部原子(或分子)的排列没有长程有序的排列特征。

本章主要介绍材料的晶体结构、非晶态特征以及材料的凝固。

第一节 工程材料的晶体结构

一、固体中的结合键

材料呈固态晶体时,原子(离子或分子)之间产生较强的相互作用,这种使原子稳定地结合在一起的作用力称为结合键。固态晶体的结合键可以分为离子键、共价键和金属键三种化学键,以及分子键和氢键等物理键。靠这些键结合的晶体相应地被称为离子晶体、共价晶体、金属晶体、分子晶体及氢键晶体等。

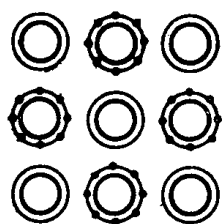


图2-1 离子键示意图
(氯化钠)

(一) 离子键

元素周期表中相距较远的两元素的原子相互接近时,通过电子的转移形成正负离子,它们以库仑引力牢固地结合在一起。这种结合力称为离子键。离子键要求正负离子相间排列。氯化钠晶体具有典型的离子键结合(图2-1)。

离子键是一种相当强的结合键,故离子晶体的硬度高、强度高,热膨胀系数小,但脆性大, MgO 、 Al_2O_3 和钢中某些非金属夹杂物即属于离子晶体。离子键中很难产生可以自由运动的电子,所以离子晶体皆为良好的绝缘体。

(二) 共价键

由共用价电子对产生的化学键叫做共价键。由共价键形成的晶体为共价晶体。共价晶体中的粒子为中性原子,所以又叫原子晶体。

金刚石是典型的共价晶体,其共价键结构如图2-2、2-12所示。金刚石是由碳原子组成

的，每个碳原子贡献出四个价电子与周围四个碳原子共有，形成四个共价键。构成正四面体结构：一个碳原子在中心，与它共价的另外四个碳原子在四个顶角上。硅、锗、锡等元素， SiC 、 Si_3N_4 、 BN 等化合物都是共价晶体。 H_2 、 N_2 、 O_2 、 Cl_2 、等单质分子和 HCl 、 H_2O 、 NH_3 、 CH_4 、 C_2H_4 等化合物也是靠共价键结合的。

共价键的结合力很强，所以共价晶体的强度大、硬度高、脆性大；熔点高、沸点高、挥发性低。总之，共价晶体结构也比较稳定。由于相邻原子所共有的电子不能自由运动，所以共价晶体的导电性很差，是很好的绝缘体。

（三）金属键

在化学元素中80%以上属于金属元素。金属原子只有少数价电子（少于3个）能用于成键。金属元素的价电子不为某个或某两个原子所共有，而为全体原子所公有。这些公有化电子称为自由电子。它们在正离子间运动，形成电子气。正离子在三维空间呈对称的规则分布。正离子和电子气间产生强烈的静电吸引力，使全部离子结合起来，这种结合力就叫金属键。由金属键结合起来的晶体为金属晶体。图2-3为典型金属键的结构（钠晶体）。

（四）分子键（范氏力）

离子键、共价键及金属键的形成伴随着价电子的得失、共有或公有化，所以它们属于化学键。此外，原子或分子的结合还存在着物理键。此时原子或分子间的结合力是很弱的范氏力，它比化学键小1~2个数量级。这种存在于中性原子或分子间的结合力叫做分子键。形成分子键时，价电子的分布几乎没有变化。

依靠范氏力结合起来的晶体为分子晶体。固态氢晶体的分子键如图2-4所示。大部分有机化合物的晶体、溴和碘的晶体都是分子晶体。

由于范氏力很弱，所以分子晶体的结合力很小、熔点低、硬度低。这种键也可以存在于其它化学键晶体中，但往往忽略不计。表2-1列出了五种键的结合能数据。在高聚物中，分子间作用力很重要，每个分子间结合力虽小，但当众多小分子聚合成长分子时，在长分子链间的范氏力就积少成多，其结合的牢固程度可以超过

表2-1 结 合 键 键 能

结 合 键	键能 KJ/mol
离 子 键	586~1047
共 价 键	63~712
金 属 键	113~350
分 子 键	<42
氢 键	<50

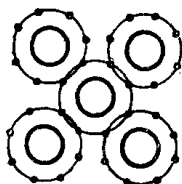


图2-2 共价键示意图
(金刚石)

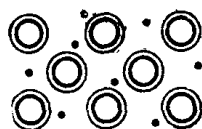


图2-3 金属键示意图
(金属钠晶体)

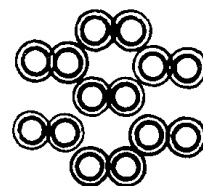


图2-4 分子键示意图
(固态氢)