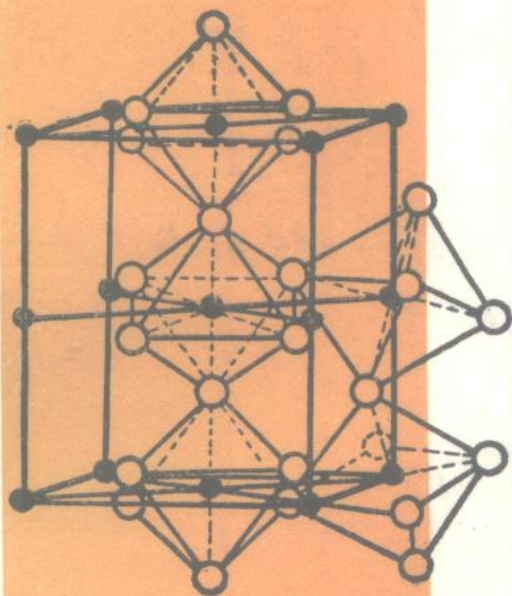
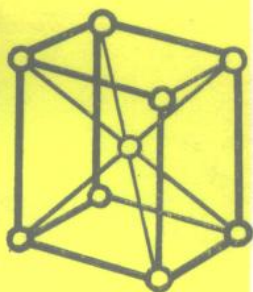


机械工程材料 简明教程



陶岚琴 王道胤 主编 北京理工大学出版社

机械工程材料简明教程

陶岚琴 王道胤 主编

北京理工大学出版社

内 容 提 要

本书根据高等工业学校机械工程材料及物理化学课程教学指导小组提出的教学基本要求, 阐明机械工程材料的基本理论, 介绍常用机械工程材料及其应用。包括金属的结构和结晶, 合金的结晶与二元相图, 铁碳合金, 金属塑性变形, 钢的热处理, 合金钢, 铸铁, 有色金属材料, 其它工程材料, 零件的失效与选材等内容。尽量选用最新公布的国家标准, 力图切实适合教学要求。

本书可作为各类高等学校机械制造(冷加工)专业使用的教材, 也可供专业技术人员参考。

机械工程材料简明教程

陶岚琴 王道胤 主编

*

北京理工大学出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

地质出版社印刷厂印刷

*

850×1168毫米 32开本 10.375印张 276千字

1991年7月第一版 1991年7月第一次印刷

ISBN 7-81013-432-9/TH·43

印数: 1—15000册 定价: 4.55元

前 言

《机械工程材料》是机械制造专业的一门重要技术基础课。机械电子工业部《工程材料》课程协作组充分讨论了国家教委机械工程材料和物理化学教材编审小组于1984年南京会议提出的《机械工程材料》课程教学大纲，一致认为出版一本符合教学基本要求的便于教和学的教材是当务之急。1989年7月，《工程材料》第五届课程协作会议决定组织编写本书，作为机械制造冷加工各专业的通用教材。

本书从机械工程材料的应用角度出发，通过基本理论和基本知识的阐述，使学生具备根据机械零件的使用条件和性能要求，对结构零件进行合理选材和制定工艺路线的初步能力。本书适用学时数约60学时，各校在使用时可根据专业要求和具体情况进行删节或补充。

本书力图切实适合教学要求。书中的有关资料尽量选用最新公布的国家标准。参加本书编写的都是在各高等院校工程材料课程教学第一线从教多年的教师，他们是：北京理工大学王道胤（绪论）、程天一（第四章）、钟家湘（第六章）、孙映坤（第八章），安徽工学院饶启治（第一章），吉林工业大学李玉龙（第二章），洛阳工学院负自均（第三章），上海机械学院杨永弟、沙家其等（第五章），太原重型机械学院张代东（第五章），沈阳工业大学王绍铨（第六章），东北重型机械学院崔占全（第七章），北京机械工业管理学院陶岚琴（第九章），陕西机械学院任润刚（第十章）。饶启治、任润刚、钟家湘和王道胤分片对各章进行了审改。全书最后由陶岚琴加工定稿。

我们荣幸地请到了德高望重的石霖教授担任本书主审。石教授抱病认真审看了全书，提出了许多宝贵意见。全体编者谨向石

霖教授致以深切的谢意。

由于编者水平所限，加之时间仓促，书中可能存在不少缺点和谬误。恳请广大读者和师生在使用中提出意见，以便不断完善。

编者

1990年9月

目 录

绪论

第一节 机械工程材料及其应用	(1)
第二节 机械工程材料的主要性能	(4)
第三节 课程的任务及内容	(12)

第一章 金属的晶体结构与结晶

第一节 金属的晶体结构	(13)
第二节 实际金属的晶体结构	(21)
第三节 金属的结晶	(24)
第四节 金属铸锭组织	(30)

第二章 合金的相结构与二元合金相图

第一节 合金中的相结构	(32)
第二节 二元合金相图	(38)

第三章 铁碳合金

第一节 Fe-Fe ₃ C相图	(55)
第二节 含碳量对铁碳合金平衡组织及其性能的影响	(68)
第三节 碳钢	(73)

第四章 金属的塑性变形和再结晶

第一节 金属的塑性变形及加工硬化	(85)
第二节 冷加工金属在加热时的变化	(95)
第三节 金属的热加工	(100)

第五章 钢的热处理

第一节 钢在加热时的转变	(105)
第二节 钢在冷却时的转变	(107)
第三节 钢的退火与正火	(116)
第四节 钢的淬火与回火	(121)
第五节 钢的表面淬火	(134)
第六节 钢的化学热处理	(139)

第七节	热处理新工艺简介.....	(147)
第八节	碳钢热处理应用举例.....	(149)
第六章 合金钢		
第一节	概述.....	(152)
第二节	合金结构钢.....	(159)
第三节	合金工具钢.....	(175)
第四节	特殊钢.....	(188)
第五节	影响钢材质量的冶金因素.....	(199)
第七章 铸铁		
第一节	概述.....	(205)
第二节	灰口铸铁.....	(210)
第三节	可锻铸铁.....	(215)
第四节	球墨铸铁.....	(220)
第五节	蠕墨铸铁.....	(226)
第六节	合金铸铁简介.....	(228)
第八章 有色金属材料		
第一节	铝及铝合金.....	(223)
第二节	铜及铜合金.....	(245)
第三节	钛及钛合金.....	(252)
第四节	轴承合金.....	(256)
第九章 其它工程材料		
第一节	高分子材料的基本知识.....	(261)
第二节	常用高分子材料.....	(269)
第三节	陶瓷材料.....	(279)
第四节	复合材料.....	(284)
第十章 零件的失效与选材		
第一节	零件的失效.....	(289)
第二节	零件选材概述.....	(293)
第三节	典型零件的选材及热处理.....	(305)
参考书目		

绪 论

第一节 机械工程材料及其应用

一、现代工业中的材料及发展趋势

人类使用材料已经有几万年的历史，当前，材料已不仅是工业生产的基础，而且成为推动工业技术不断前进的重要保证。

材料可以粗略地分为两大类，即金属材料和非金属材料。金属材料又分为黑色金属（钢铁）材料和有色金属（非铁金属及其合金）材料两类；非金属材料通常又分为无机非金属材料 and 有机高分子材料两类。随着材料学的发展，单一金属或非金属材料无法实现的优良性能又通过复合材料得以实现。复合材料发挥了各基本材料的长处，克服了各自的弱点，因而得到了积极的开发和广泛的应用。

从应用的角度，人们习惯将材料分为两大类。一类是以机械性能为主要使用性能或兼具一定物理、化学性能的“结构材料”；另一类叫做“功能材料”，所谓“功能材料”是指那些具有特异物理化学性质的材料，如超导材料、激光材料、半导体材料、形状记忆材料等。机械工程专业所用的主要是结构材料。

近几十年来，工程材料迅速发展，其总的趋势是金属材料的统治地位已被动摇，开始出现了金属材料、陶瓷材料和有机高分子材料三足鼎立的新局面。

有机高分子材料（包括工程塑料、橡胶和胶粘剂）正以前所未有的速度发展着。工程塑料世界年产量超过150万吨，通过各种合成或制备技术，性能不断提高，应用日广。有人预测，汽车的车身不久将大部分采用塑料，每公斤工程塑料可代替1~5公斤钢铁，而且可整体成型，因而成本和油耗将进一步降低；有机高

分子功能材料发展更快，由于它是人工合成的，且原料充足，可以设计出无穷的新品种，前景十分广阔。

陶瓷材料近 20 年中再度兴起，以研制陶瓷发动机为契机，在世界范围内兴起了陶瓷热。应该看到，陶瓷作为工程结构材料，在实际应用中尚有许多问题待解决，而陶瓷用作功能材料，已经获得了大量的成果，在高技术领域中占有重要的地位。

以上两类材料的发展速度虽然很快，但还不能全面地代替传统的金属材料，金属材料目前在工业中，特别是在机械工业中，仍然占有主导地位。值得注意的是，由于自然界中金属矿产资源日益减少，必须厉行节约并努力提高其使用效能。

二、金属材料的应用与特点

机械制造工业中的各种机床与工具，农业生产中使用的拖拉机、收割机以及各种农具，都在广泛地使用着金属材料。各种车辆、船舶等交通运输工具，国防上的飞机、坦克、军舰、枪炮和子弹，也都离不开金属材料。至于发电、配电及送电设备，化工设备，仪器仪表及日常生活用品等，更是处处需要金属材料。

金属材料为什么获得如此广泛的应用呢？这是因为金属材料可以满足各种各样的性能要求。第一，金属材料（特别是钢）一般均具有优良的机械性能，能承受一定载荷而不变形、不断裂，凡是需要承受高负荷的机器零件和结构件，或传送大功率的传动件，都要用金属材料来制造。例如，铁路上的钢轨，虽然截面不大却能承受机车高速行驶时施加给它的极大负载。机车和汽车上的传动轴和齿轮，可以传递巨大的功率。第二，金属材料具有优异的物理性能。主要指优良的导电性、导热性和磁性等。例如，输送电流的导线是由导电性优良的铜、铝制造的。变压器中的导磁铁芯是用具有优良磁性的硅钢片制成的。这些是非金属材料所不能胜任的。第三，金属材料还有优良的工艺性能。这是指金属材料具有能够通过铸造、压力加工、焊接和切削加工等成型和加工方法，制成各种形状和精度的合格产品的性能。

各种机器总有一定的使用寿命。机器零件在使用过程中失去原有设计功能称为失效。为防止机器在未达到使用寿命时提前失效，机械设计人员必须学会根据零件的性能要求，正确选择和合理使用材料，以充分发挥材料的性能潜力。

长期的实践证明，为了满足在制造和使用时的不同性能要求，大多数金属材料可以通过在固态下进行加热与冷却的“热处理”等工艺方法，在较大范围内改变金属材料的性能。例如，利用这种特性，在加工常用的锉刀时，可以通过不同的加热、冷却工艺，使制造过程中钢材较软，而在最终使用时又有高的硬度和耐磨性。这一经验，早在我国明朝《天工开物》一书中就有记载。

三、金属材料性能的影响因素

不同成分的材料具有不同的性能，如Cu和Fe的性能不同。同样是Fe和C的合金，含碳量不同，性能也不同，含碳量高则硬，含碳量低则软。此外，处理工艺不同，也会使材料的性能发生变化。

随着科学技术的进步，人们不断探索材料的微观奥秘。发现材料性能是与材料微观组织结构有关的。19世纪末，光学显微镜帮助人们迈入了材料的微观世界。20世纪初，X射线衍射用于测定金属的晶体结构。50~60年代，电子显微镜使人们看到金属内部更细微的结构以至原子排列的图像。70年代，光电子能谱可以研究几个原子层中的成分和状态变化。深入的研究证明，材料成分和处理工艺主要是通过改变材料内部的微观组织而影响材料的性能。决定金属材料性能的根本因素是微观组织结构。

生产中为了改变金属材料的性能，常采用改变材料成分的合金化方式或采用不同的处理和加工工艺，都是通过促使金属材料内部的组织变化而达到目的的。

第二节 机械工程材料的主要性能

金属材料的性能可分为使用性能和工艺性能。使用性能是指金属材料制成零件或构件后，为了保证正常运转和一定工作寿命所应当具备的性能，包括机械性能、物理性能和化学性能。工艺性能是指为了保证金属材料加工过程顺利进行而必须具备的性能，包括铸造性、冷热压力加工性、焊接性、切削加工性和热处理工艺性。金属材料的使用性能是选择材料和研制材料的主要出发点，而工艺性能对提高劳动生产率、改善产品质量和降低成本有着重要的作用。

一、机械性能

材料的机械性能是指材料在各种外力作用下所表现的性能，也叫力学性能，它是设计人员与工艺人员至为关心的一个重要问题。掌握材料的机械性能是设计零件、选用材料时的重要依据。同时，材料的机械性能指标也是控制材料质量的重要参数。

这里，仅对以下几种常见的机械性能指标的获得及其实用意义进行扼要的说明。

1. 强度

工程中所说的强度，通常是指材料在常温、静载下抵抗产生塑性变形或断裂的能力。它是由光滑试样单向拉伸试验测定的。

图 0—1 所示为典型的低碳钢拉伸时的应力应变曲线。由图可见，试件从受力开始直至被拉断，大体上分为四个阶段。

在 oa 范围内是弹性阶段，应力与应变符合虎克定律，呈线性关系，试件只产生弹性变形。

sc 是屈服阶段（或称流动阶段），其特点是试件所承受的载荷几乎不变，但却产生着不断增加的塑性变形。与 s 点相对应的应力称为屈服强度（即屈服极限），用 σ_s 表示成下式：

$$\sigma_s = \frac{P_s}{F_0} \text{ (MPa)}$$

式中 P_s 为试验中指针第一次回转后的最小载荷。 F_0 是试件原始横截面积。显然，屈服强度表征了材料抵抗产生微量塑性变形的能力。

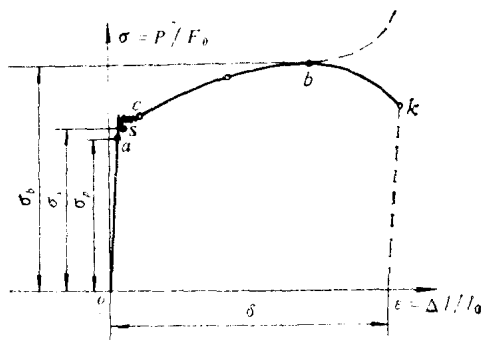


图 0-1 低碳钢拉伸时的应力应变图

cb 是强化阶段，也称均匀塑性变形阶段。在此阶段内，欲使试件继续变形必须加大载荷，且试件均匀伸长。 b 点是曲线的最高点，与该点相对应的应力称为抗拉强度（即强度极限），用 σ_b 表示成下式：

$$\sigma_b = \frac{P_b}{F_0} \text{ (MPa)}$$

式中 P_b 是试件在断裂前的最大拉力，抗拉强度表征了材料抵抗最大均匀变形的能力。

bk 称为局部变形阶段。当载荷增加到超过 b 点以后，试件出现局部变细的缩颈现象。由于缩颈处的截面积急剧缩小，试样实际能负担的载荷是减少的，所以按原始横截面积计算出来的应力也是减少的，如图0-1中实线所示。但用实际瞬时横截面积计算出来的真实应力是增加的，如图中虚线所示。真实应力的增加表明缩颈后的变形拉力仍在不断增加，这个现象称之为应变硬化现象。

试件拉伸至 b 点时发生断裂。与 b 点对应的真实应力表征材料抵抗断裂的能力。脆性材料一般不产生缩颈现象，拉断前的最大应力即断裂应力，用抗拉强度 σ_b 表征材料抵抗断裂的能力。对于塑性材料，因为产生缩颈后试件负担的外力不会增加反而缩小，所以断裂时的真实应力在工程上没有实际意义。

屈服强度 σ_s 和抗拉强度 σ_b 是材料重要的机械性能指标，它们是零部件强度设计的主要依据。因为在一般情况下，既不允许零件产生塑性变形，更不允许发生断裂。

有些非塑性材料在应力应变图中没有明显的屈服阶段，它的屈服极限很难测定。通常规定产生0.2%塑性变形时的应力作为名义（或条件）屈服强度，用 $\sigma_{0.2}$ 表示。

2. 塑性

断裂前金属材料产生塑性变形的能力称为塑性。通常用延伸率 δ 作为材料的塑性指标，即

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

式中 l_0 是试件拉伸前的标距长度； l 是试件拉断后的标距长度。

延伸率 δ 的数值是与试样标距长度有关的。标准的圆形试样长度有 $l_0 = 5d_0$ （ d_0 是试样直径）和 $l_0 = 10d_0$ 两种，前者称为短试样，后者称为长试样，测出的延伸率分别用 δ_5 和 δ_{10} 表示。同一种材料， δ_5 和 δ_{10} 的数值是不相等的， δ_5 大于 δ_{10} ，不能进行比较。

金属材料的塑性还可用断面收缩率 ϕ 表示。即

$$\phi = \frac{F_0 - F}{F_0} \times 100\%$$

式中 F_0 是试件原始横截面面积； F 是试件拉断后断口处的横截面积。断面收缩率的数值不受试样尺寸的影响。

δ 或 ϕ 愈大，表示材料的塑性愈好。良好的塑性是金属材料进行压力加工的必要条件。

3. 刚度

材料在受力时抵抗产生弹性变形的能力称为刚度。通常用材

料在弹性范围内，应力应变的比值即弹性模量 E 来作为衡量材料刚度的指标。 E 愈大，刚度愈大。即在一定的应力作用下产生的弹性变形愈小。

弹性模量 E 的大小，同材料的原子之间作用力的强弱有密切关系，但 E 值对金属及合金的显微组织的变化是不敏感的。所以热处理和少量的合金化可能使钢的强度明显增长，但其刚度却基本保持不变。

4. 硬度

硬度是衡量金属材料软硬程度的指标。硬度愈高，表示材料抵抗局部塑性变形的能力愈大。一般情况下，硬度高耐磨性就较好。塑性材料的硬度和强度之间存在着一定的对应关系。

硬度试验方法较简单，又无损于零件，故在生产中广为应用。对于脆性较大的材料，如淬硬的钢材和硬质合金等，只能通过硬度测量对其性能进行评价，而其它试验方法（如拉伸、弯曲等）则无能为力。最常用的硬度指标有布氏硬度和洛氏硬度。

（1）布氏硬度 用一定直径的钢球或硬质合金球，以相应的静载试验力压入试样表面，经一定的保持时间后，卸除试验力，测量试样表面的压痕直径 d ，如图0-2。用试验力除以压痕球形表面积所得的商即为布氏硬度值。布氏硬度一般不标注单位，硬度值愈高，表示该材料愈硬。

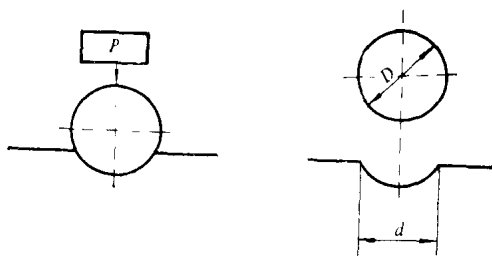


图 0 2 布氏硬度试验原理

用淬火钢球作压头，只能测定硬度不高的材料，如软钢件、铸铁和有色金属的硬度。测得的硬度表示为“ $\times \times \times \text{HBS}$ ”，习惯

上也经常不标注“S”，只写成“ $\times \times \times \text{HB}$ ”。当钢件硬度高于450 HB时，要换用硬质合金球作压头，测得的硬度值记作“ $\times \times \times \text{HBW}$ ”。

在实际测定布氏硬度时，载荷 P 和压头直径 D 可根据国家标准选择。用刻度放大镜测量压痕直径 d ，直接查表即可求得硬度值。

(2) 洛氏硬度 洛氏硬度试验是目前应用最广的测定硬度的方法。它也是一种压入试验方法，是以压痕深度的大小表示材料的硬度。即在初负荷 P_0 及总负荷 P 分别作用下，将压头（金刚石圆锥体或钢球）压入试样表面，然后卸除主负荷 P_1 ，在初负荷作用下测定压痕深度的残余增量 e ，用一个定值 h 和 e 的差值表示材料的硬度，如图0-3所示。

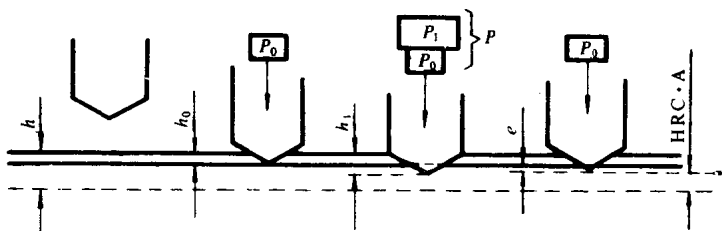


图 0-3 洛氏硬度试验原理

洛氏硬度值没有单位，直接用数字表示。实际测定时，这一数值可以由硬度计刻度盘上直接读出。材料愈软，读数愈小。

为了用一种硬度计测定从软到硬的金属材料的硬度，可选用不同的载荷和压头，将硬度值分成三种标度，其符号分别以HRC、HRB、HRA。这三种硬度的应用范围列于表0-1，其中HRC应用得最广泛。HRC常用来测量一般淬火硬化钢件，HRA测量更硬的材料或用来测极薄层材料的硬度，HRB则为测量较软的材料。

洛氏硬度法操作迅速、简便、压痕小，无损于工件表面，故经常用以测量成品或薄的零件。

此外，为测定工件薄的表面硬化层或金属镀层以及薄片金属

表 0-1 三种洛氏硬度

标 尺	标尺硬度值 确定方法	测量范围	初 负 荷 kgf(N)	主 负 荷 kgf(N)	压头类型
HRA	100— c	60~85	10(98.1)	50(490.3)	金刚石圆锥体
HRC	100— c	20~67	10(98.1)	140(1373)	金刚石圆锥体
HRB	130— c	25~100	10(98.1)	90(882.6)	钢 球

的硬度，也常采用维氏硬度法。其测定原理基本上与布氏硬度法相同。但使用的是 136° 的金刚石棱锥体为压头，载荷较小且在很大范围（5~100kg）内可调，故既可测很软的，也可测很硬的金属材料。

5. 冲击韧性

这是材料在冲击载荷作用下抵抗断裂的一种能力。目前工程技术上常用一次摆锤冲击弯曲试验法来测定材料承受冲击载荷的能力。

将一定尺寸和缺口型式的标准试样放在冲击试验机的底座上，然后使具有一定位能的摆锤自由落下将试样冲断。冲断试样所消耗的功 A_k ，直接由试验机的刻度盘指示出来，如图0-4所示。用试样缺口处截面积 F 去除 A_k ，即得冲击韧性值 α_k (kJ/m^2)。

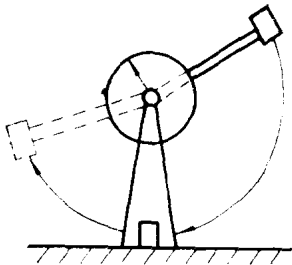


图 0-4 冲击试验原理图

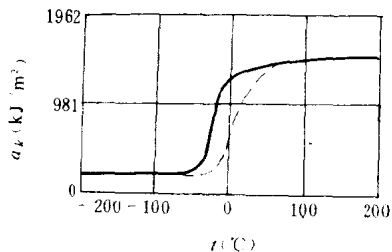


图 0-5 材料的冲击韧性随温度的变化关系

由于 α_k 值的大小不仅决定于材料本身，而且还随试样尺寸、形状的改变以及试验温度的不同而变化。因而 α_k 只是一个相对指标。目前国际上直接采用冲击功 A_k 作为冲击韧性的指标，其单位是J（焦耳）。

实践证明，冲击韧性对材料微观组织微小变化的反应是极敏感的。因而 A_k 值是生产上经常用来检验冶炼，热加工和热处理质量的重要指标。

材料的冲击韧性在某一温度会急剧降低，如图0-5所示，材料在越过这一温度时，将会发生脆性断裂。这一温度称为脆性转化温度。材料的脆性转化温度愈低，则使用愈可靠。

应当指出，大多数机器的零部件是在小能量多次冲击载荷下工作的。深入的研究表明：在能量不太大的情况下，材料承受多次重复冲击的能力主要取决于强度指标，而不是决定于冲击值。如目前广泛采用球墨铸铁制造拖拉机中柴油发动机的曲轴，其冲击值并不大（ A_k 约为12J），然而使用效果良好。因此对于小能量多次冲击下工作的零部件，不必要求过高的冲击值，而主要应该具有足够的强度。

6. 疲劳强度

机械工程中不少零部件，例如发动机的曲轴、连杆，常在交变载荷下工作。另外有些零部件，例如传动轴，虽然受到的载荷并不随时间而交替变化，但本身在旋转。在这些条件下工作的零部件，即使是用塑性材料制成的，而且最大应力低于材料在静载荷下的屈服极限，但经长期使用后，也可能发生突然断裂的事故。通常将这种破坏称为“疲劳断裂”，事故是突然发生的，因此具有很大的危险性。

材料在无数次重复“交变应力”作用下，而不致引起断裂的最大应力称为“疲劳强度”，并以 σ_{-1} 表示。对于钢铁材料，应力循环次数达到 $10^6 \sim 10^7$ 次仍不发生断裂，则可认为材料不会再发生疲劳断裂，也可以用与此相对应的应力值作为疲劳强度值。

材料的疲劳强度与材质本身的内在质量、零件表面状况、结