

# 工程材料及其 力学行为

余同希 李世莺 编著

湖南教育出版社

# 工程材料及其

# 力学行为

余同希  
李世莺

编著

湖南教育出版社

## 工程材料及其力学行为

余同希 李世莺 编著

责任编辑：欧阳维诚

湖南教育出版社出版发行（东风路附1号）

湖南省新华书店经销 湖南省新华印刷二厂印刷

850×1168毫米 32开 印张：11.125 字数：280,000

1992年7月第1版 1992年7月第1次印刷

ISBN 7-5355-1414-6/G·1409

定 价：5.30元

# 前 言

材料科学是现代科学技术的三大支柱之一，在现代化建设中起着重大作用。同时，材料科学与相邻学科之间的交叉渗透，是当今世界上科学研究的一个活跃前沿。作为传统学科的固体力学，近年来一个引人注目的热点就是同材料科学日益紧密地结合起来，解决材料科学中提出的各种力学问题，并为新材料的设计、研制和改进服务。这种发展趋势对我们工程技术人员和大专院校师生提出了新的要求：学习和了解材料的微观结构和宏观行为之间的内在联系，将材料学的知识和固体力学的知识融汇贯通起来。

本书是在参照国内外多种教材和专著的基础上，结合作者本人的教学和科研经验写成的，其初稿曾在北京大学力学系的教学过程中试用。本书只要求读者具有高等数学、理论力学和材料力学的基本知识，对相关的化学、物理知识以及较深入的力学知识都将在本书内由浅入深地予以介绍。在阐述上，力求清晰易懂，微观结构与宏观行为的讲解并重，并着力将二者联系起来；还有不少应用实例，以帮助读者理解。在内容安排上，第一章为引论；第二至五章依次介绍几类最重要的力学行为及其微观机理；第六至七章介绍与力学行为关系密切的某些材料性质及其微观机理；第

八至十一章则比较具体地分门别类地介绍金属、陶瓷、聚合物和复合材料的微结构、力学行为的特点以及加工成型的方法等。

本书可作为高等院校工程力学专业以及土木、机械、航空等类的某些专业的教材或教学参考书；也可供有关专业教师和工程技术人员在学习现代科学知识时参考。

作者感谢北京应用物理与计算数学研究所陈发良同志，他仔细校阅了本书初样。

由于作者的知识范围和水平有限，又是初次尝试编写这种类型的书籍，疏漏和错误之处在所难免，恳请专家和读者们批评指正。

余同希 李世莺

1990年12月

# 目 录

## 前言

<b>第一章 引论</b> .....	(1)
§ 1.1 导言 .....	(1)
§ 1.2 材料的分类 .....	(2)
§ 1.3 材料的性质 .....	(4)
§ 1.4 根据材料性质选择材料 .....	(5)
§ 1.5 材料的可获取性和价格 .....	(7)
<b>第二章 弹性</b> .....	(12)
§ 2.1 弹性模量 .....	(12)
§ 2.2 原子的键合 .....	(16)
§ 2.3 固体中原子的堆积 .....	(29)
§ 2.4 杨氏模量的物理基础 .....	(41)
§ 2.5 由模量控制的设计的实例研究 .....	(49)
<b>第三章 塑性</b> .....	(55)
§ 3.1 屈服、强度、硬度和延性 .....	(55)
§ 3.2 晶体的位错和屈服 .....	(64)
§ 3.3 多晶体的强化 .....	(74)
§ 3.4 宏观塑性分析的几个结果 .....	(83)
§ 3.5 由屈服控制的设计的实例研究 .....	(88)
<b>第四章 断裂与疲劳</b> .....	(95)
§ 4.1 快速断裂和韧度 .....	(95)
§ 4.2 快速断裂的微观机制 .....	(103)
§ 4.3 疲劳 .....	(111)
§ 4.4 断裂和疲劳的实例研究 .....	(122)

<b>第五章 蠕变和冲击性能</b> .....	(126)
§ 5.1 蠕变的宏观描述 .....	(126)
§ 5.2 蠕变的微观机理 .....	(132)
§ 5.3 材料的冲击性能 .....	(143)
<b>第六章 氧化与腐蚀</b> .....	(156)
§ 6.1 材料的氧化 .....	(156)
§ 6.2 材料在潮湿环境中的腐蚀 .....	(162)
§ 6.3 局部腐蚀 .....	(168)
§ 6.4 实例研究 .....	(176)
<b>第七章 摩擦与磨损</b> .....	(181)
§ 7.1 摩擦 .....	(181)
§ 7.2 磨损 .....	(190)
§ 7.3 摩擦和磨损的实例研究 .....	(194)
<b>第八章 金属</b> .....	(199)
§ 8.1 金属材料的种类及性质 .....	(199)
§ 8.2 金属材料的结构 .....	(202)
§ 8.3 平衡组分与相图 .....	(207)
§ 8.4 结构变化的微观机制 .....	(213)
§ 8.5 金属的强化 .....	(223)
§ 8.6 钢铁 .....	(229)
§ 8.7 实例研究 .....	(235)
§ 8.8 金属的加工、成形和连接.....	(240)
<b>第九章 陶瓷</b> .....	(250)
§ 9.1 各类陶瓷及其性质 .....	(250)
§ 9.2 陶瓷的结构 .....	(254)
§ 9.3 陶瓷的力学行为 .....	(260)
§ 9.4 陶瓷的加工、成形和连接.....	(271)
<b>第十章 聚合物</b> .....	(279)
§ 10.1 聚合物概述.....	(279)

§ 10.2	聚合物的力学行为·····	(294)
§ 10.3	聚合物的加工、成形和连接·····	(309)
<b>第十一章</b>	<b>复合材料</b> ·····	<b>(320)</b>
§ 11.1	概述·····	(320)
§ 11.2	纤维增强复合材料·····	(323)
§ 11.3	颗粒复合材料·····	(333)
§ 11.4	夹层复合材料与多胞材料·····	(335)
<b>参考文献</b>	·····	<b>(345)</b>



# 第一章 引论

## § 1.1 导言

### 1.1.1. 人类文明与材料的关系

自远古以来,人类为了自己的生存,就要利用材料。原始人用兽皮和树叶做成衣服来御寒,用树枝和茅草搭成栖身之所。在狩猎、耕作等生产活动中更需要使用材料来制作生产工具。最早是打制石斧、石锄和石镰;后来有了陶瓷(这是材料史上第一次大飞跃),它为人们提供了熟食;然后经过漫长的发展,人们学会冶炼铜、铁、钢、铝等金属,这才有了近代工业。由于材料与人类文明有着不可分割的联系,历史学家才以材料的名称来划分时代,这就是:旧石器时代,新石器时代,青铜器时代,铁器时代,等等。近代资本主义是钢铁的时代。在19世纪后半叶,由于钢铁冶炼技术的改进,钢铁的成本下降了十几倍,而世界上钢铁的产量提高了几百倍。有了钢铁,才有各种机械、汽车、轮船,才有现代工业。同样,如果没有铝和其它轻合金,就不会有航空航天工业。本世纪初的时候,人们知道的陶瓷只有家用的陶器、瓷器,而聚合物只有天然的羊毛、棉花等等。本世纪以来,出现了许多种类的工程陶瓷和人造聚合物,80年代登记注册的新老材料已达30多万种。有的科学家认为,人类在钢铁时代之后,又跨越了铝器时代和塑料时代,正在向高性能陶瓷和复合材料时代过渡。这种提法虽然没有得到公认,但新材料的使用标志着人类文明的新阶段这一点则是无可置疑的。

### 1.1.2. 固体力学与材料科学的关系

在现代科学技术中,材料科学已和能源科学、信息科学并列

为三大支柱。许多科学技术领域都和材料科学有着密切联系。作为传统学科的固体力学，近年来正在与材料科学的交缘地带萌发出许多富有生机的生长点，成为科学研究的活跃前沿。

固体力学研究的是固体和结构在载荷和环境（如温度、辐射等）的作用下发生变形、运动和破坏的规律。这种规律通常是由以下三个方面结合起来决定的：1) 固体受力后平衡和运动的规律；2) 固体和结构的变形几何学；3) 材料的物性规律，即应力、应变、温度等等之间的内在关系，也叫作本构方程 (Constitutive equation)。前两个方面的规律可以用理论力学和数学来解决，而第三个方面同材料科学紧密相关，它往往是问题的关键和难点所在。一方面，由于现代技术往往要求在复杂的载荷和环境使用材料（例如航天飞机重入大气层时表面最高温度可达  $1500^{\circ}\text{C}$ ，而且机身耐热材料要反复使用 100 次），这时材料的行为是无法由其常规行为外推的。另一方面，新材料不断涌现，迫使科学家们必须建立合理的力学模型来描述它们的力学行为。例如在弹性力学和塑性力学中分别采用线弹性模型和弹塑性模型，它们可以较好地描述大多数金属材料在一定范围内的行为；而对于许多聚合物，这些模型就不再适用了，因为它们呈现出明显的粘性（变形随时间增加而增大的性质），需要建立包含粘性的力学模型。

## § 1.2 材料的分类

表 1—1 对为数众多的现代材料作了一个大体的划分。

表 1—1

材料	{	金属材料 (Metals)	{	黑色金属	生铁:灰口铸铁,球墨铸铁等。 碳钢:低碳钢,中碳钢等。 合金钢:不锈钢,合金工具钢等。
				有色金属	轻金属:铝、镁等。 重金属:铜、铅、镍等。 贵金属:金、银、铂等。 稀有金属:锂、钨、钼等。 半金属:硅、砷等。
		无机非金属材料 陶瓷(Ceramics)	{		传统陶瓷。
					玻璃:SiO <sub>2</sub> 等。 水泥、混凝土。 耐火材料:MgO等。
				精陶瓷:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (刚玉),SiC(金刚砂)等。	
有机高分子材料 聚合物(Polymers)	{	合成纤维:锦纶、涤纶等。 合成橡胶。 塑料:聚乙烯(PE),聚苯乙烯(PS), 聚氯乙烯(PVC)等。 合成粘胶剂和涂料。 部份液晶。			
		复合材料 (Composites)	{	木材等天然材料。 非金属基复合材料:玻璃纤维增强树脂(GFRP)等。 金属基复合材料:硼/铝,碳/铝等。	

上述粗略分类中的四大类材料间的相互关系如图 1—1 所示。

根据一份国外资料的预测,公元 2000 年世界上各类材料的产值将分别为:

金属  $10 \times 10^9$  美元,

陶瓷  $12 \times 10^9$  美元,

聚合物  $10 \times 10^9$  美元,

复合材料  $3 \times 10^9$  美元。

可见在不久的将来,金属、陶瓷和聚合物在材料世界上的确将成三

足鼎立之势，而复合材料亦将占相当重要的地位。

### § 1.3 材料的性质

材料的性质首先是根据材料的化学成分和微观结构决定的，而在选择和应用工程材料时更关心的是材料的宏观性质。表 1—2 列出了在工程中最关心的一些材料性质。

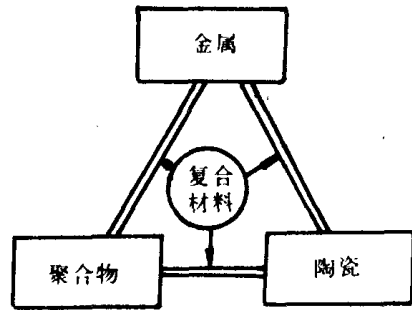


图 1—1 几大类材料的相互关系

表 1—2

材料性质分类：

1. 总体力学性质(Bulk mechanical properties)
  - 密度(density)
  - 弹性模量(modulus)
  - 机械强度(mechanical strength)
  - 延性(ductility)
  - 断裂韧性(fracture toughness)
  - 疲劳强度(fatigue strength)
  - 蠕变强度(creep strength)
  - 其它
2. 总体非力学性质(Bulk non-mechanical properties)
  - 热学性质(thermal properties)
  - 光学性质(optical properties)
  - 磁学性质(magnetic properties)
  - 电学性质(electrical properties)
3. 表面性质(Surface properties)
  - 摩擦(friction)、磨损(wear)
  - 氧化(oxidation)、腐蚀(corrosion)

4. 生产加工性质:制造,加工,连接等
5. 美学性质:外观,织构(texture)等

在汉语中,讲到一种材料或物质的“性质”,往往暗示着它是由材料或物质自身决定的。实际上,材料的宏观性质既取决于材料的内在结构(内因),如原子的种类、原子的键合、原子的配置、相的微观结构(如晶粒)等,还取决于材料的工作环境(外因),如所承受的应力、温度、化学环境、辐射环境、电磁场等等。工作环境不同时,材料性质会有很大变化,例如金属在低温下变脆(延性和韧性降低),塑料在高温下变软(强度降低)等。所以,不能离开工作环境来选择材料或比较材料的优劣。

为了更好地体现内在结构和工作环境两方面对材料的影响,我们下面有时不说“材料性质”,而用“材料行为”(material behaviours)这个术语。可以说,材料的行为是材料对给定的条件和环境的一种响应。例如强度试验就是改变应力状态看材料如何响应。事实上,任何一种材料性质的定义总是同一定的试验条件相联系的,例如延性是用试件在单向拉伸条件下最大应变可达到多少来度量的,如果换成双向拉伸,最大应变值就会不一样了。

从工程应用的角度来看,以利用力学性质为主的材料统称为结构材料,以利用非力学性质为主的材料称为功能材料,虽然力学性质其实也是一种功能。在本课程中我们主要只研究结构材料的行为,或者说主要只研究工程材料的力学行为。

## § 1.4 根据材料性质选择材料

工程师在设计一个结构或一个零件时,首先会面临选择材料的问题。通常的做法是先主选一个性质,例如航天飞机的材料必须比强度高,即强度高而重量轻。但是要注意,工程所要求的往往不只是这一个主要性质,例如航天飞机返回地球时外层结构要耐高温。在选材时过分要求一种性能往往会牺牲其它性能,例如强度很高的金属往往断裂韧性差。所以,选材时必须兼顾各项性能要求,

加以综合平衡。

选材通常要经历以下四个步骤：1)分析对材料的要求；2)粗选候选的材料；3)对粗选出来的材料加以评估；4)选出最合要求的材料。

即使对一些很小的产品，工程师也需要根据经验来完成这些选材步骤。这里举一个螺丝刀的例子。典型的螺丝刀是由带刃口的转轴和手柄构成的。通常，带刃口的转轴采用高碳钢制造，选择高碳钢主要是利用它的弹性模量很高这一点。当材料承受拉伸、弯曲、扭转时，模量越高则变形越小。如果你采用塑料这样的低模量材料做转轴，拧螺钉时它自身就会变成麻花状。但是高模量并非唯一的要求，事实上我们还要求转轴具有高的屈服强度（否则拧一次就永久变形了），还要求刃口有很高的硬度（否则刃口很快就被划伤了）；此外还要求它能抗断裂，例如玻璃的模量、屈服强度、硬度都很高，但它不能拿来做转轴或刃口，因为它太脆了。

螺丝刀的手柄在传统上是用木材做的，为什么不用钢铁呢？因为钢铁又重又硬，手感不舒服；而由于手柄的横截面比转轴大得多，采用低模量材料完全没问题，所以就选中了木材。现在大多数螺丝刀的手柄改用有机玻璃，这里用到了许多其它可取的性质：易加工制造，外观好，不导电，不会氧化；甚至还用到了它的光学性质：透明，因而可以看到内部的电笔指示。

作为另一个例子，让我们看看大型喷气客机上用的 Rolls-Royce 燃气轮机的选材。在燃气轮机的入口处有一个透平风扇，它把空气压入发动机。现在透平风扇的叶片采用钛合金，因为它不仅具有很高的模量、屈服强度和断裂韧性，而且还能抗疲劳（考虑到载荷的脉动性）、抗表面磨损（考虑到空气中的小颗粒会高速撞击到叶片上）和抗腐蚀（考虑到飞机在海洋附近起飞时空气中有含盐的水分）。曾经试验过碳纤维增强聚合物（CFRP），其重量比钛合金轻一半，其它性能也不错，可惜抗冲击性能不够好，如果一只飞鸟被吸入透平风扇，那么叶片就会被打坏，造成重大事故。

对于发动机自身的叶片,所提的要求还要更多一些。为了使燃料产生更高的能量,发动机内的温度应尽可能高。目前第一排叶片要经受 950°C 的高温,因而除了象透平风扇叶片一样的要求外,还要考虑蠕变和氧化。最后采用的是非常昂贵、制造十分复杂的镍基合金,它代表了目前材料工程的高技术。

发动机中另一个重要部件是火花舌,其中间是一个火花电极,周围是绝缘体。火花电极要经受热疲劳、磨损、氧化、腐蚀等等,最后选定的是一种钨合金。绝缘体要经受热疲劳、氧化、腐蚀,同时又要在高温下绝缘,最后选定的是一种陶瓷:  $Al_2O_3$ , 即刚玉。

## § 1.5 材料的可获取性和价格

在选择工程材料时,除了要考虑它的性质之外,还必须考虑它的可获取性和价格这两个重要因素。有些材料虽然性质很好,但数量太少难以获取,或是价格过于昂贵,就很难广泛应用。

### 1.5.1. 地球的组成

从长期、全局来看,材料的可获取性和价格同我们居住的地球上的资源有关。地球上的主要元素按重量的百分比如表 1—3 所示。

表 1—3

地壳(1km 深,总重 $3 \times 10^{21}$ kg)				海洋( $10^{20}$ kg)		大气( $5 \times 10^{18}$ kg)	
氧	47%	钠	3%	氧	85%	氮	79%
硅	27%	钾	3%	氢	10%	氧	19%
铝	8%	镁	2%	氯	2%	氩	2%
铁	5%	.....		钠	1%	.....	
钙	4%	碳	0.02%	.....			

虽然这个表没有列出绝大多数重量百分比低于 1% 的元素,但从这一简表已经可知,铁和铝今后仍是我们主要的金属来源。陶瓷大部分是氧化物,如氧化铝、氧化硅、氧化镁等,也有充分的贮

存。有机物的主要成分是碳、氢、氧，这三者资源都很丰富。现在人类每天都从地球中抽取很多碳(石油、天然气等)，但大都被烧掉了。有些未在表 1—3 中列出的元素，如水银、银、钨等，贮存量是不多的，它们作为一种材料供应将不能维持很长时间了。

### 1.5.2. 资源、贮量与消耗

仅仅了解某一元素在地球中所占的百分比并不足以说明它的可获取性，因为并不是所有的矿床都是可以开采的，有的埋得太深，有的含量太贫因而提炼费用太贵，有的处于不毛之地难以开采，等等。所以，有必要区分两个概念：一是资源(resource)，指的是按地质勘探查明或估计的数量，显然这有很大的不确定性；另一个是贮量(reserve)，指的是按当前技术值得去开采的所有矿床的数量。显然后者小于前者，且一般不成比例关系。图 1—2 称为 McElvey 图，体现了二者之间的关系。

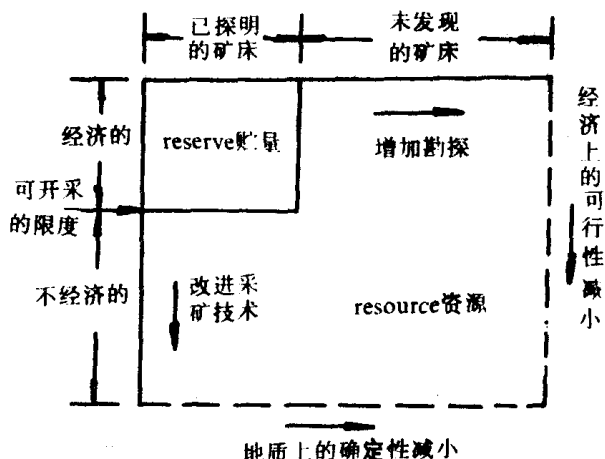


图 1—2 贮量与资源的关系

尽管各种材料的资源量很不确切，但我们估算某一种材料还能维持多久时仍要以资源量作为依据；同时我们需要对这种材料的消耗量作出预测。从统计规律知道，对某种材料的需求通常是按



一定百分率逐年增长的。若这种材料当前的年消费量为  $C$ ，年增长率为  $r\%$ ，则

$$\frac{dC}{dt} = \frac{r}{100} \cdot C.$$

积分得出

$$C = C_0 \exp \left\{ \frac{r(t-t_0)}{100} \right\},$$

其中  $C_0$  是  $t=t_0$  时的年消费量。令  $C/C_0 = 2$ ，就得到消费增加一倍所需的年数

$$t_D = \frac{100}{r} \log_e 2 \approx \frac{70}{r}.$$

例如，对于钢  $r=3.4$ ，于是  $t_D=20$  年；铝  $r=8$ ，于是  $t_D=9$  年；聚合物（在美国） $r=18$ ，于是  $t_D=4$  年。

按照这样的方法进行测算，发现世界上石油只能供应 25 年；许多重要的材料，如银、锡、钨、锌、铅和水银经过 50~80 年都会消耗掉一半的资源，从而发生短缺和价格急剧上涨；而铁、铝和制造陶瓷、玻璃的原料则可延续数百年不会有问题。

### 1.5.3. 材料的价格

材料的价格是由供求关系决定的，既同可获取性有密切的关系，同时又为市场法则所左右。当然，近十年价格又有了很大变动。价格的变动可分为短期的脉动和长期的变化。前者主要取决于供求关系、股票市场以至政治因素（如某一生产国的政变等）；后者则基本上反映了材料采掘、运输、加工、制造成本上的变化，影响因素主要是通货膨胀、能源费用的增长以及资源本身的减少。原料的采掘和加工都要耗费能量，因而能源消耗在材料成本上占有很大比重。表 1—5 列出了几种主要材料的能耗，单位是 GJ/吨。

表 1—4

铝	300	钢	50
塑料	100	水泥	8
铜	100~500	砖	4