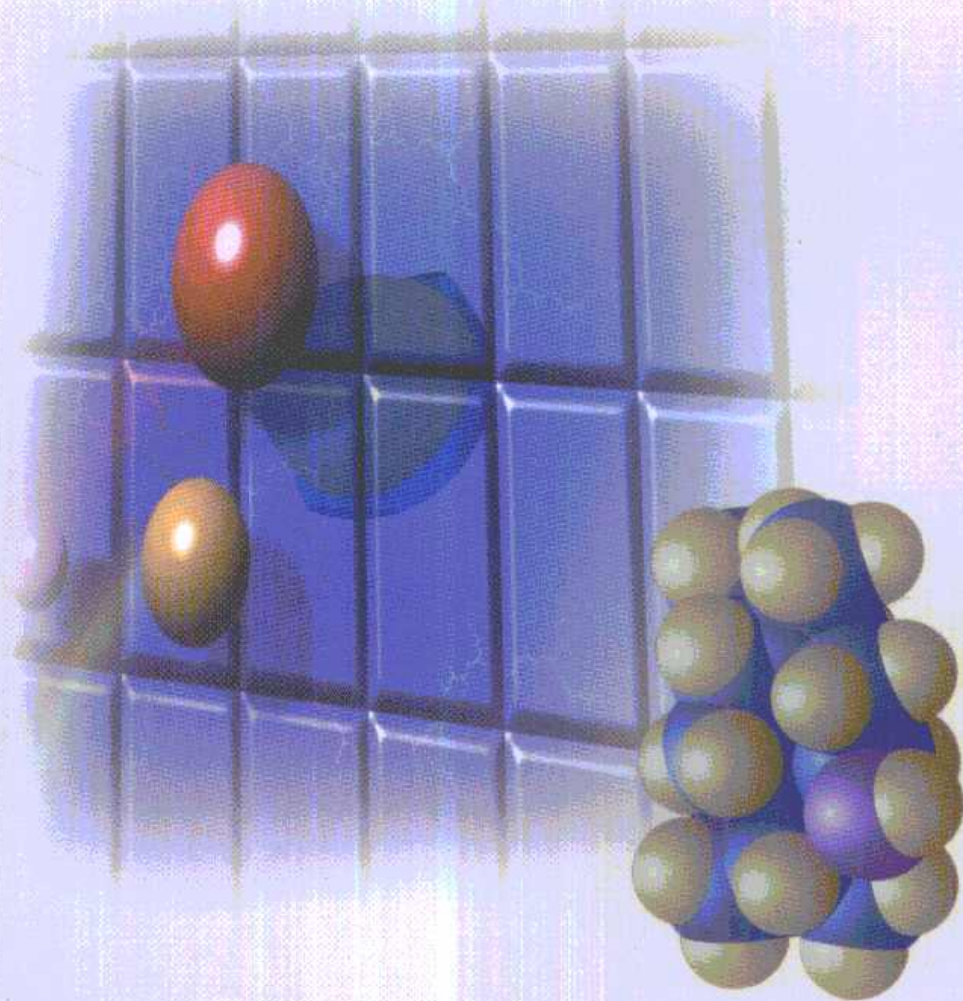


高等学校专业教材

材 料 导 论

高分子材料与工程专业系列教材

励杭泉 编



 中国轻工业出版社

TB3-43

L38

744

高等学校专业教材
高分子材料与工程专业系列教材

材 料 导 论

励杭泉 编



A0925839

 中国轻工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

材料导论/励杭泉编. —北京: 中国轻工业出版社, 2000. 6
高等学校专业教材
ISBN 7-5019-2623-9

I. 材… II. 励… III. 材料科学-高等学校-教材 N. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 23463 号

责任编辑: 赵红玉 责任终审: 滕炎福 封面设计: 赵小云
版式设计: 智苏亚 责任校对: 燕 杰 责任监印: 崔 科

*

出版发行: 中国轻工业出版社 (北京东长安街 6 号, 邮编: 100740)

网 址: <http://www.chlip.com.cn>

联系电话: 010-65241695

印 刷: 中国人民警官大学印刷厂

经 销: 各地新华书店

版 次: 2000 年 6 月第 1 版 2000 年 6 月第 1 次印刷

开 本: 787×1092 1/16 印张: 15.75

字 数: 363 千字 印数: 1—3000

书 号: ISBN 7-5019-2623-9/TQ·185 定价: 30.00 元

·如发现图书残缺请直接与我社发行部联系调换·

第 1 章 绪 论

1.1 材 料 概 述

材料是工程技术的基础与先导。现代社会的进步，在很大程度上都依赖于新材料的发现与发展。科学家与工程师们都认识到发展尖端技术的前提是发展新材料与新材料加工技术，并在近 20 年来在这方面有了空前的重要进展。所以许多人将我们这一历史时期称为“材料时代”。

材料是宇宙间可用于制造有用物品的物质。有用指除了使用价值外，还需具有一定的性能，如物理性质、化学性质和力学性能等。物品可以是单件的器件或元件，可以是组装的机器与仪器，也可以是集成的系统。根据材料的基本性质与结构，可以将其分为四大类，即金属、陶瓷、聚合物和复合材料。

我们常常使用“工程材料”这个词。工程材料在较广的定义上与“材料”相差无几，但它还有一个比较专门的定义，指那些具有专门设计的结构、专门的性能、专门用于某一领域的材料。例如美国材料标准测试协会（ASTM）对工程塑料的定义是：

Those plastics and polymeric compositions for which well defined properties are available such that engineering rather than empirical methods can be used for the design and manufacture of products that require definite and predictable performance in structural applications over a substantial temperature range.

即：具有确定性质的塑料或聚合物复合物，可用工程方法（而不是经验方法）设计并生产产品，这种产品作为结构件应用时，在较宽温度范围内具有确定的、可预测的使用性能。

根据以上繁琐的定义，聚碳酸酯和聚甲醛属于工程塑料，在制造管材、凸轮和齿轮方面可以代替钢铁和木材；而聚苯乙烯和聚氯乙烯则属于通用塑料，它们缺乏承受载荷的能力，只能用来制造包装和容器。

从事材料，尤其是工程材料的开发、研究工作的学科领域称为材料科学与工程。美国科学院对材料科学与工程的定义为：

Involves the generation and application of knowledge relating the composition, structure, and the processing of materials to their properties and uses.

即：材料组成、结构、加工与材料性质、使用之间关系的发现与应用。材料科学着重于发现材料的本质，并由此对结构与组成、性质、使用性能之间的关系作出描述与解释；而材料工程则是应用材料科学的知识，对材料进行开发、制造、修饰并实现其具体应用。有人认为材料科学与工程属于工程科学，实际上它是个交叉学科或多学科领域，涉及固体物理学、金属学、陶瓷学、高分子化学与高分子物理等。

为开发新的工程材料，材料学家们先是设计出新的材料结构，再开发出新的制造方法，使材料的种类呈几何级数增长。据粗略统计，目前我们共拥有 45 000 种金属合金，15 000 种聚合物，还有近千种陶瓷、木材、复合材料和纺织品。让我们看一辆小轿车所用材料的更新情况。以 1986 年梅塞德斯-奔驰轿车为例，使用了 67% 的钢铁、12% 的聚合物、4% 的合金铝和 12% 的纺织品。而一辆 1996 年的同牌号汽车，钢铁下降到 62%，聚合物增加到 18%，合金铝增加到 6%。不仅是汽车行业，其它行业中使用聚合物的比例也在增高。在日常生活中更不必说，每个人都能感受到身边的塑料制品是越来越多了。图 1-1 是材料成熟曲线，它是根据了解到的发展规划绘制的。可以看出聚合物、陶瓷、复合材料的应用将大幅度增加。复合材料是一种或多种材料的结合体。玻璃钢与混凝土是两个最熟知的例子。当然今天的复合材料不会那样简单，而是集高强度、低重量于一身的工程化材料。

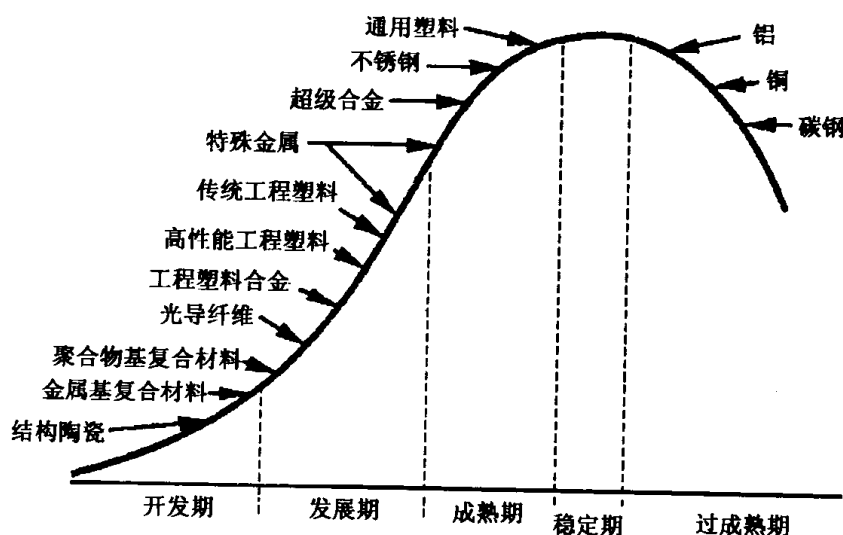


图 1-1 材料成熟曲线

为进一步看清高精尖材料的发展脉络，不妨对飞机结构材料的发展作一简短的回顾。因为很少有像飞机那样的制品对材料的性质、重量及工作温度有那样严格的要求。世界上第一架金属飞机是德国 Hans Reissner 公司于 1912 年设计制造并试飞成功的，它的机翼材料是纯铝。到 30 年代初期，出现了合金铝的机身和机翼，如波音 757 的材料就是 80% 的合金铝、12% 钢铁和 3% 的复合材料。以铝为主的材料结构延续了很长时间，到超音速时代就不得不改变了。因为铝的强度只能维持到 195℃。目前唯一的超音速客机协和式和 SR71 式侦察机的机身都采用了钛合金。麦道公司于 70 年代设计的 Harrier 式飞机，率先将铝合金全部换成了碳纤维与环氧树脂的复合材料。Voyager 式飞机由于大量采用复合材料，一次加油就能够绕地球一周。目前已经出现了除发动机外全部用复合材料制造的飞机。

喷气发动机的材料是含镍、钴、铬的超级合金。用此超级合金制造的发动机能在较高温度下工作，由此带来了较高的飞行速度和较低的油耗。工作温度越高，飞行效率也就越高，所以进一步提高工作温度就成了工程师们不断追逐的目标。但合金的结构、组成再合理，终究有个熔点。目前合金的工作温度上限已达 1040℃，开发的潜力已经不大。采用高熔点金属如钽、铌、钼、钨等是一种解决办法。但这些金属在高温下非常容易同气体作用，需要表面保护层。采用陶瓷作保护层的研究尚未成功。人们绕道而行，只将发动机中最热的部分换上陶瓷或陶瓷复合材料。陶瓷的工作温度最高可达 2760℃，所以材料学家把眼睛都盯在陶瓷身上。

汽车工程师们也加入了陶瓷材料的开发，因为汽车内燃机也同样面临提高工作温度的问题。为了使内燃机的金属材料不致过热，在运行中必须用水不断冷却，因此有三分之一的能量消耗在冷却过程中。如果能用陶瓷制造内燃机的缸体，就能一举取消冷却系统，节省大量的能量。目前唯一的障碍是陶瓷的脆性。制造韧性陶瓷成了人们不断努力的目标。

不仅是飞机和汽车，连自行车的材料也在日新月异地发展。美国最新开发出来的 Trek 山地车，车架是用 60% 的碳纤维加 40% 环氧树脂的复合材料，轴承是浸渍聚四氟乙烯的复合材料，制造商称这是世界上最坚固、最轻便的自行车。

除以上的例子外，在本书中我们还会看到大量的事例，说明材料科学与工程如何带动交通、运输、信息、通讯、娱乐、卫生等各行业的进步，如何带动社会的进步。

1.2 材 料 环

如上节中的定义中所述，材料是宇宙中可用来制造有用物品的物质。这些物质以各种形式分布在地球上、地壳中、海洋中甚至大气中。这些物质不断地被发掘、被提取、被加工、被利用。在材料的使用过程中有一部分会自动回到最初在大自然中的存在形式，在物品的使用寿命过后大部分材料可以被重新利用。物质在这一系列过程中，从一种存在形式转化为另一种存在形式，生生不息。这一过程可以看作是一个循环圈，我们将之称为材料环。从图 1-2 所示的材料环中我们可以看到物质如何被转化成为材料，材料的存在形式如何转变，更重要的是我们可以看到材料被发掘利用的各个阶段，由此可以看到材料在日常生活中的工程技术中的重要性。

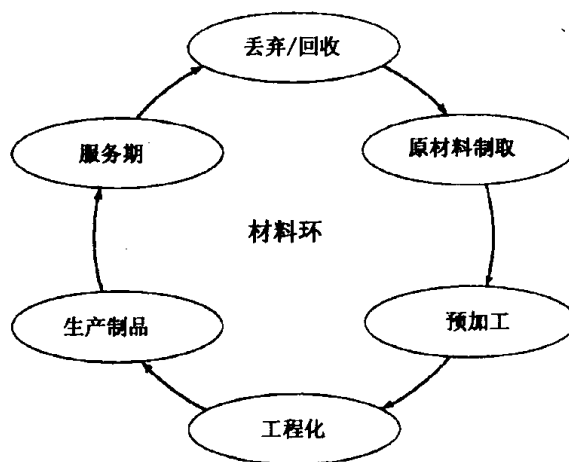


图 1-2 材料环

1.2.1 原材料的制取

从初中化学中我们就知道，物质分为单质与化合物。单质指纯元素，目前已知的有 110 种。单质直接可以作为材料的只有寥寥数种，如金、铂等。单质碳如金刚石、石墨等，也是存在于大自然中的材料，这种材料没有原材料的概念。绝大多数材料都必须先得到原材料，再进行进一步加工生产。不同的材料有其不同的原材料，不同原材料的制取方法又不同。例如钢铁，要从铁矿石中冶炼得到；金属铝，要通过电解铝矾土得到。但今天大部分的铝并不是从电解铝矾土得到的，而是通过废料回收重新炼制得到的。最熟悉的例子莫过于易拉罐的回收利用。如果不是易拉罐中的铝材不断回收利用，易拉罐的价格不会这样低，而且我们城市中大街小巷恐怕早已堆满五颜六色的易拉罐了。

陶瓷的原材料是粉体。用矿物的粉体进行压制、烧结就能够得到陶瓷制品。陶瓷粉体的制取我们将在第 5 章作详细介绍。

高分子材料的原材料制取比较复杂。绝大多数高分子材料并不存在于自然界中，而是人类用有机原料合成的。用于合成的有机原料称为单体，例如聚乙烯的单体是乙烯，聚苯乙烯的单体是苯乙烯，尼龙 66 的单体是己二酸与己二胺，聚酯的单体是对苯二甲酸和乙二醇酯。

经过加成聚合或者缩合聚合,就能够得到高分子原材料。合成过程相当复杂,我们将在第3章作简单介绍。

1.2.2 材料的预加工

通过金属的冶炼,高分子的聚合,陶瓷粉体的精制,可以分别得到不同材料的原材料。有些原材料可以一步加工成为物品,如陶土烧结成为器皿,塑料颗粒通过注射成型制造玩具、家电外壳等。这种生产过程没有预加工这一步。但在很多生产过程中,先是将原材料制成一定规格、一定尺寸的预制件或零件,以供进一步加工使用。例如橡胶可预制成管材、片材、皮带、垫圈等,塑料可以预制成管材、板材、薄膜等。金属预加工的种类更多,可预制成带钢、角钢、工字钢、钢板,还可以制成齿轮、垫圈、螺钉、螺母等。零件可直接用于装配,预制件可按需要进行切割后进一步加工。在电子工业中,预制件就是元件,如二极管、三极管,甚至集成电路。尽管这些元件的结构可能非常复杂,但从生产和应用的角度看,它们尚不是直接应用的物品,还须进一步装配或加工,所以只能算是预加工的产物。

1.2.3 材料的工程化

工程化即高性能化。这一步可以是独立的一步,也可以与上两步中的任一步同时发生。所谓高性能化指的是使材料具备高性能——高耐热性、高强度、高模量、高韧性、高耐磨性等——的加工过程。不同种类材料的高性能标准不同。以高耐热性为例。塑料耐 250°C 就称得上耐高温,钢铁则必须耐 800°C 以上,陶瓷必须耐 1500°C 以上才能称得上是耐高温。传统的工程化过程可以举出钢铁的热处理,如淬火、回火;金属的表面处理,如渗碳、渗氮等都是工程化过程。但因数百年来一直沿用,故一般看作是常规加工手段,不称作工程化。

现代的材料工程化过程以复合材料的加工过程为代表,以纤维复合材料最为典型。所谓纤维复合材料,可看作将一种纤维分散到一种基体之中形成的材料,也可以看作是用一种基体材料作粘结剂将纤维材料粘结起来形成的材料。这种材料既兼具纤维和基体的性能,通过二者的复合还会产生二者都不具备的性能。

工程化的高层次含义是材料的仿生化与智能化。人们力求模仿蜘蛛吐丝的机理和蜗牛筑壳的机理,制造出质量轻、强度高的材料。智能化的例子有智能玻璃,可以根据外部光线的强弱自动变化玻璃的颜色;还有电流变体,可以根据外加电场的强弱改变粘度。随着材料科学技术的发展,工程化将逐渐成为材料环上最重要的一环。

1.2.4 产品的制造

这一步是利用预制件、零件制造直接供人们使用的物品。如果直接从原材料制造,可能会涉及材料组织与结构的变化。但如果仅仅是利用预制件的零件进行装配,将不涉及材料组织与结构的变化,但也会涉及材料所处环境的改变:不同种类的材料发生接触,装配使材料经受应力,生产过程中材料经受温度、湿度的改变、表面状态的变化及尺寸的变化。所以哪怕仅仅是简单的装配,对材料也会有一定的、有时是显著的影响。例如不同金属发生接触时,就会发生电化学腐蚀(见第8章)。加工过程中人为操作的因素也会对材料产生影响。消除这一影响的措施是利用计算机实现生产的自动化。

1.2.5 产品的服役

产品在被使用过程中经受着比加工过程更严酷的考验。产品可能要在阳光下曝晒，可能要承受巨大的载荷，可能经受很高或很低的温度，可能与介质发生摩擦，可能受到大气或化学物质的侵蚀……。当然，产品必须按设计要求在服役期内保持应有的性能，但产品质量时会影响产品的服役。这样，服役期间可能伴随着产品的维修。维修是服役期内的补充制造过程。产品服役到期或中途报废，都标志着这一阶段的结束。

1.2.6 丢弃与回收

这是材料环的最后一节，也可以视为材料的第一节。如果材料不能回收利用而被丢弃，就成为最后一节；如果被回收利用，就成为第一节。经过某种加工过程，就回到原材料的状态。最易于回收利用的是金属材料、钢铁和铝等的回炉迄今非常成功。纸张的回收造纸也是人们的传统作法。废旧塑料的回收利用是最不成功的。一是由于不同塑料混杂后无法区分，而混杂塑料的性能是十分低劣的。二是由于某些塑料是不可再加工的，如泡沫聚苯乙烯包装。橡胶轮胎也属于不可再加工的物品，至今只能以高成本进行低温粉碎或焚烧发电。聚合物的回收利用问题在全世界已显得日益紧迫。所幸的是人们已发明出利用超临界状态使聚酯（饮料瓶所用材料）回到聚合前的对苯二甲酸和乙二醇酯的技术，这是一个可喜的信号。如果塑料都能回到聚合前的状态，白色污染的问题今后将不再困扰负担过重的自然界。

1.2.7 材料环的缺口

材料环是不完整的，不是完美的圆形，它存在缺口。材料的发掘利用给自然界，给人类社会带来了后遗症。采矿、钻井、森林砍伐都会造成破坏性的后果。矿尾经雨水的冲刷给植物、动物、河流、湖泊造成污染；钻井会造成有害物质的溢出；森林砍伐更会造成水土流失，并使动物无家可归。

但另一方面，如果不采矿，不钻井，不砍伐森林，我们无法拥有今天巨大的物质财富，不可能拥有今天繁荣的世界。但我们必须认识到资源是有限的，可丢弃废物的空间更是有限的。每个人都应该利用材料学的知识，最大程度地合理利用自然资源，保护自然环境，保护我们唯一的家园。

1.3 材料家族

世界上的材料成千上万，不可能逐一认识每一种材料。研究材料最方便的方法是根据性质相近的原则将它们分成若干大类，大类之下再分成若干小类，尽管类与类之间有重叠，分类还是便于掌握材料之间的异同与联系。

如表 1-1 所示，我们将材料分作四大类：金属、陶瓷、聚合物和复合材料。每大类之下又都有几小类。不宜归入四大类的材料合称“其它材料”。

表 1-1

材料家族

大 类	小 类	示 例
金属材料	钢 铁	铸铁、碳钢、合金钢
	有色金属	铝、铜、锰、锡、镁、金
	金属粉末	烧结钢、烧结黄铜
聚合物	合成聚合物	塑料、弹性体、粘合剂、纸
	天然聚合物	木材、天然橡胶
	动 物	骨骼、皮肤
陶 瓷	结晶陶瓷	瓷器、陶器、磨料、建材 结构粘土
	玻 璃	玻璃器皿
复合材料	聚合物基	三合板、层压塑料板、浸渍木料、玻璃钢、石墨/环氧
	金属基	碳纤维/铝、Primex
	陶瓷基	磁强混凝土、碳碳复合材料
	金属陶瓷	碳化钨、铬/氧化铝
其 它	电子材料	半导体、超导体
	保护涂层	阳极氧化铝
	生物材料	植入物
	智能材料	形状记忆合金、形状记忆聚合物

1.3.1 金属材料

人类使用金属材料已有几千年了。公元前 3000 年人类进入青铜时代，公元前 1100 年进入铁器时代，到今天我们还没有走出这个铁器时代。金属可以定义为坚硬、反光、有光泽、热与电的良导体。金属可以分为两类：钢铁与有色金属。为什么铁这一种元素独占一类，而其它金属只占一类呢？首先由于钢铁的用量超过了其它金属用量的总和，1988 年全世界钢铁产量与有色金属产量之比为 7:1。其次，钢铁的冶炼方法与其它金属如铜、镍、铝等不同。正是冶金专家最先提出将钢铁单列一类。当然也有一些金属学家不同意这种分类。但在本书中我们仍沿袭习惯的分类法。

1.3.1.1 钢铁

钢铁又被总称为黑色金属，包括铸铁、钢与其它一些铁合金。用铁制造工具始于公元前 1300 年的巴勒斯坦，在我国则始于战国时代。钢与铸铁都基本上为铁和碳的合金，钢的碳含量不超过 2%，铸铁的碳含量为 2%~4%。碳含量超过 2% 的合金非常脆，无法用锻压等方法成型，只能浇铸成型，铸铁由此得名。95% 的汽车发动机底座、曲轴、活塞环、千斤顶等都用铸铁制造。高档汽车的这些部件不用铸铁而用合金铝，以降低重量。今后这两种材料都将被复合材料取代。铸铁可以分为灰铸铁、白铸铁、可锻铸铁等，详见第 7 章。钢，由于其强度高，延展性好，来源丰富，价格低廉，在今后很长一段时期内仍将占据结构材料的主流。钢虽是历史最悠久的材料之一，近年来仍不断有新的品种问世，每种都在现代设计中占有一席之地。

1.3.1.2 有色金属

主要的有色金属包括铝、铜、镍、镁、钛和锌。这六种金属的合金占了有色金属总量的90%。每年使用的铝、铜和镁有30%得到回收利用，这就进一步增加它们的用量。这六种之外值得一提的是铅。铅一般不作合金使用，而以纯态作电池的屏蔽材料。

1.3.2 陶瓷

提起陶瓷我们不免想起茶杯饭碗、砖头瓦片之类，但陶瓷的含义要广得多，是一切无机非金属材料的总称。陶瓷在组成上是金属与非金属的结合体，并可按组成中的非金属元素进行分类。如果是金属与氧、氮或氢的结合体，就称为氧化物、氮化物或氢化物。卤化物（氟、氯、溴、碘的化合物）也可视作一类特殊的陶瓷。虽然它们一般不作结构材料使用，但在光学透镜方面有一定的应用。陶瓷处于固态时大都是晶体，晶格结构比金属复杂得多。硅酸盐是来源最丰富的陶瓷材料，因为硅和氧都是地壳中含量最丰富的元素。沙子的主要成分就是二氧化硅。二氧化硅处于自然状态时是结晶的。加热到1700℃时熔化为液体。同其它液体一样，是非晶的。当二氧化硅液体再冷却时，结晶却十分困难，除非在极慢的降温条件下。如果降温速度较快（如空气中自然降温），就会形成过冷液体——玻璃。这种不结晶的玻璃我们也归入陶瓷一类。

1.3.3 聚合物

聚合物可以分成三类：热塑性塑料、热固性塑料和弹性体。热塑性塑料由线形长链分子组成，加热到某一温度（或为玻璃化温度或为熔点）时就发生流动，可以反复进行加工成型。热塑性塑料可以是结晶性的也可以是非结晶性的。聚乙烯是典型的结晶性热塑性塑料。热固性塑料是加热后即发生固化的材料。有些热固性塑料在室温就能与固化剂发生作用而固化，如环氧树脂。固化后分子形成三维的交联网络，不能再次成型加工；无法回收利用。热固性塑料都是非结晶的。弹性体俗称橡胶，其特征是能够在很小外力下产生高达1000%的大形变，当外力撤除后形变能够立即恢复。或者说橡胶具有很高的弹性。由此可知，橡胶分子处于自然状态下是高度卷曲的，只有这样才能够发生大形变并具有回弹的动力。天然橡胶是弹性体的代表。其分子也是线形的，但结构较聚乙烯复杂。天然橡胶的原料是橡胶树中流出的白色浆汁，其中除含聚异戊二烯大分子以外，还有少量液体、蛋白质和无机盐。但这种浆汁干燥后还不是弹性体。1879年Goodyear发明了硫化方法，将天然橡胶与硫磺共同加热，能够造成橡胶大分子的交联。交联后的天然橡胶才具有弹性，成为名副其实的弹性体。

1.3.4 复合材料

复合材料是含多种组分材料，其中每种材料仍然保持特性。照此定义，许多天然材料都是复合材料。例如木材就是纤维素与木质素的结合体，但一般不把木材看作复合材料。第一个人工制备的复合材料是玻璃钢，即玻璃纤维与环氧树脂的结合体。可相互结合的材料对数不胜数，可以是聚合物纤维与聚合物基体，可以是陶瓷纤维与金属基体，也可以是碳纤维与各种基体包括碳基体。让不同材料结合的目的是凸显材料的优势，弥补材料的不足。例如将强而脆的陶瓷纤维分散到弱而韧的金属中，所得到的复合材料的强度介于陶瓷纤维与金属基体之间，而材料绝无脆性。按表1-1，复合材料可根据基体分为聚合物基、陶瓷基、金属基等几类。也可根据复合的结构分为层合型、纤维型与颗粒型三类。见图1-3。

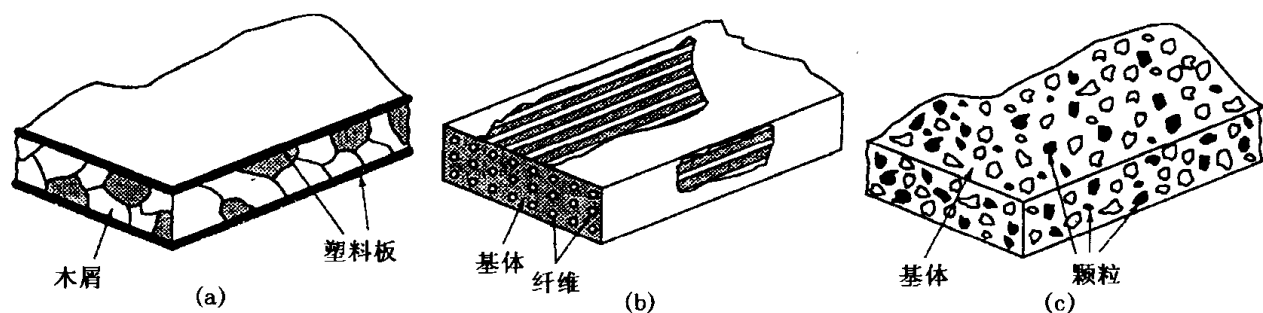


图 1-3 复合材料的种类

(a) 层合复合材料 (b) 纤维复合材料 (c) 颗粒复合材料

1.3.5 其它材料

从表 1-1 可以看到一些“其它材料”的例子。它们之中有些不宜归入四大类材料，有些则是具有鲜明的特色，用途有别于其同类，只好拿出来单独讨论。

“智能”是“其它材料”的一大特色。模仿肌肉、神经等身体系统的功能，使材料能够自动适应外部环境的变化。古代术士梦寐以求的是点石成金，而今天的材料学家用普通的原材料通过结构设计，就能取得不同凡响的功能：能够适应外力或温度的变化调整结构；能够对结构缺陷自行修复；能够预警反馈断裂的危险。这种智能材料已经应用在智能房屋上。窗玻璃能够根据阳光的强弱在透明和乳白色之间变化。但变化的不是玻璃本身，而是夹在两层之间的液晶。外墙涂料也是智能的，夏天变成亮色以反射阳光，冬天变成暗色以吸收阳光。一种镍钛合金“Nitinol”表现出另一种智能-形状记忆。即使遇到剧烈或很大的形变，也会对最初的形状牢记不忘。用 Nitinol 制造的眼镜腿，可以在手指上绕一周后立即弹回原先的形状。古代诗人的感慨“可怜百炼钢，化作绕指柔”今天竟成为现实。

以上列举的几种新材料预示着新材料时代的黎明。我们常说知识爆炸，实际上材料的数量也在爆炸。复合材料的出现彻底改变了工程设计的概念。以前进行设计时，如果找不到合适的材料，就只能改变设计；而今天则可以根据工程要求来设计材料，这为每位工程设计师与材料工程师都提供了施展才华的广阔天地。

参 考 文 献

1. Ashby, M. F., and D. R. H. Jones. Engineering Materials: An introduction to Their Properties and Applications. Elmsford, N. Y. : Pergamon, 1980
2. Asimov, Isaac. Building Blocks of the Universe. New York: Abelard, 1957
3. Bellmeyer, Fred W. Synthetic Polymers. Garden City, N. Y. : Doubleday, 1972
4. Betts, John E. Physics for Technology. Reston, Va. : Reston, 1964
5. Brown, Theodore L., and H. Eugene Lemay, Jr. Chemistry. The Central Science, 2nd Ed. Englewood Cliffs, N. J. : Prentice Hall, 1981
6. Chaudhry, A., T. Joseph, F. Sun, and C. Rogers. “Local-Area Health Monitoring of Aircraft Via Piezoelectric Actuator/Sensor Patches.” North American Conference On Smart Structures and Materials, San Diego, Calif., 26 Feb.-3 March, 1995
7. Christiansen, G. S., and Paul H. Garrett. Structure and Change: *An introduction to the*

Science of Matter San Francisco: W. H. Freeman, 1960

8. Cotterill, Rodney. *The Cambridge Guide to the Material World*. Cambridge: Cambridge University Press, 1989

9. Craig, Douglas F. "Structural Ceramics," National Educators' Workshop, NEW Update 91, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn., November 12, 1991

10. Drago, R. S. *Prerequisites for College Chemistry*. New York: Harcourt Brace Jovanovich, 1966

11. Ewen, Dale, and Leray Heaton. *Physics for Technology Education*. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice Hall, 1981

12. Gamow, George A. Mr Tomkins *Explores the Atom*. New York: Macmillan, 1945

13. Giancoli, Douglas C. *Physics*. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice Hall, 1980

14. National Research Council. *Materials Science and Engineering for the 1990s: Maintaining Competitiveness in the Age of Materials*. Washington, D. C.: NRC, 1989

15. Peterson, I. "Buckyballs For Scanning Surfaces," *Science News*, March 30, 1991

16. Shackelford, James, and William Alexander. *The CRC Materials Science and Engineering Handbook*. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 1991

17. Smith, Charles O. *Science of Engineering Materials*. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice Hall, 1977

练习与思考

- 1-1. 举例说明如果忽略了材料环的整体作用会造成的不良后果。
- 1-2. 讨论新材料与材料加工新技术的出现对现代工业的影响。
- 1-3. 举例说明新材料如何引导科技进步。
- 1-4. 什么是材料的工程化? 试举几个材料工程化的例子。
- 1-5. 什么是金属材料能够区别于聚合物和陶瓷材料最显著的特征?
- 1-6. 列举几种你见到过的和心目中的复合材料。
- 1-7. 你日常接触的塑料与聚合物是何关系? 热塑性与热固性塑料主要区别是什么?
- 1-8. 列举几种正处于发展期的新材料。
- 1-9. 讨论材料开发对自然界的影响。

第 2 章 材料的性质

材料的性质是材料选择的重要依据。比如我们要买一辆汽车，就要在多种汽车之间进行比较。除了大小、外观、配置之外，还要比较性能，如启动性能、加速性能、转弯性能、刹车性能、油耗高低等等。选择材料也是这样，在考虑材料的来源、材料的经济性、材料对环境的影响（这些因素我们将在第 9 章讨论）之外，最重要的就是材料的性能。材料的性质可以罗列数百种之多，我们暂不必一一了解，在此只择其要者，作一简单介绍。在本书中将材料的性质分为三类：化学性质、物理性质和力学性质。化学性质包括了材料的化学组成、原子或分子结构、凝聚态结构以及环境对材料的作用。有关晶体结构和环境对材料的影响我们将在第 6、8 章专门讨论，其它各层次的结构将会在各种材料中具体讨论。因此在本章中我们只对材料一般的力学性质与物理性质作较详细的描述。在图 2-1 中归纳了三类性质所包含的内容。我们必须清楚，没有归入图 2-1 中的性质远比图中的要多得多。

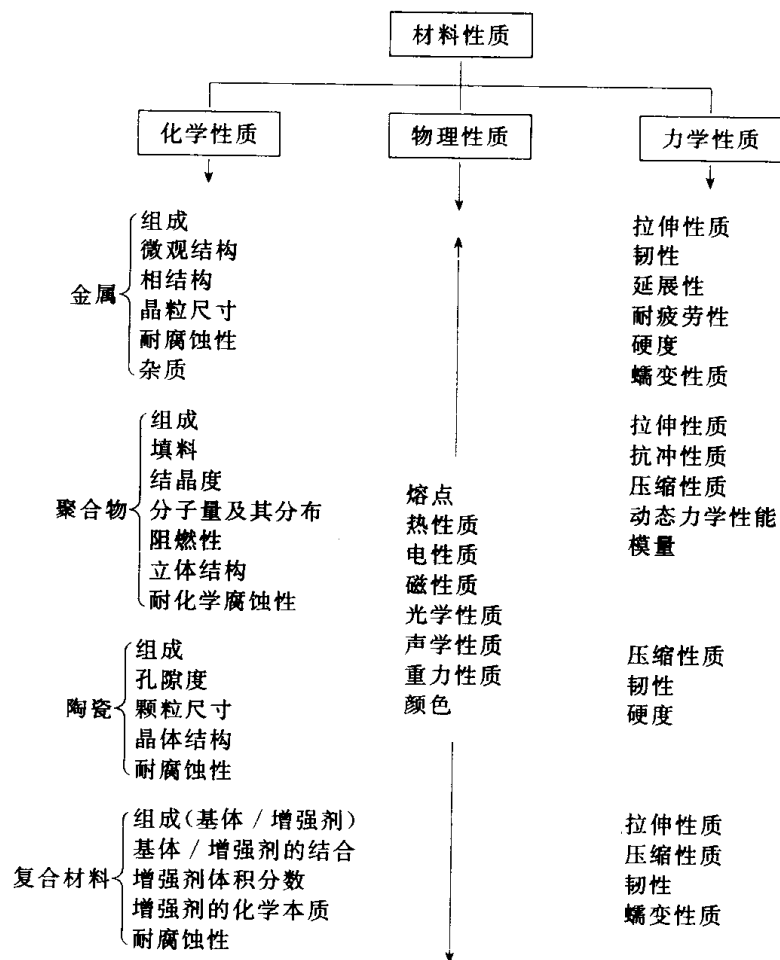


图 2-1 材料性质谱

2.1 力学性质

2.1.1 应力-应变曲线

拉伸试验测定材料对静态的或缓慢施加的外力的抵抗力。测试中必须采用哑铃形试样,形状如图 2-2 所示。高分子材料使用 (a) 的形状,金属材料使用 (b) 的形状。陶瓷材料很脆,不容易加工成哑铃形标准样品,一般不作拉伸测试。测试装置如图 2-3 所示,在拉伸测试过程中,仪器同时记录对样品所施加的力以及样品的长度,将外力和长度分别换算为工程应力和工程应变:

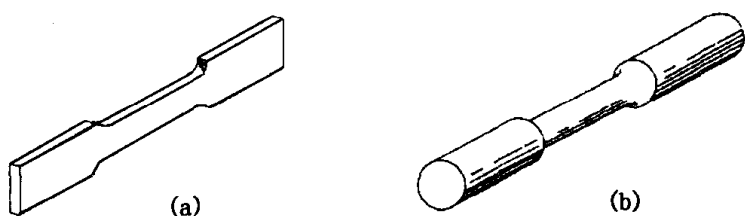


图 2-2 拉伸测试用样品

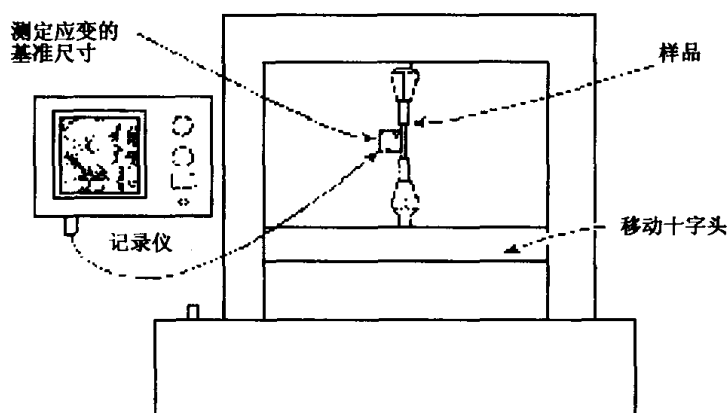


图 2-3 拉伸性能的测试装置

$$\text{工程应力: } \sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2-1)$$

$$\text{工程应变: } \epsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (2-2)$$

式中 A_0 ——样品的初始截面积;

l_0 ——初始有效长度;

l ——外力为 F 时样品的有效长度。

根据工程应力与工程应变的值后可以作出应力-应变曲线。典型的低碳钢的应力-应变曲线见图 2-4。从图中可以看到起始部分为直线,在这一区域内应力与应变呈线性关系。如果在这一区域撤除外力,样品会恢复测试前的初始长度,故这一段称为弹性区。材料在弹性区服从虎克定律,即

$$\sigma = E\epsilon \quad (2-3)$$

式中 E ——弹性模量,即直线部分的斜率。

直线部分之后的应力-应变曲线是不规则的非线性部分。这两部分的分界线称为屈服点。

屈服点后形变仍可大幅度增加，但应力升高则十分有限。在这一区域撤除外力，样品不再会回到初始长度，我们说样品产生了永久形变。不是所有的材料都有明显的线性段和明显的屈服点，如图 2-5 中灰铸铁的应力-应变曲线，二者都没有。但不能因此而认为灰铸铁没有弹性，在较低应力下这种材料还是具有一定弹性的。如果应力-应变曲线的直线部分不清楚，则以曲线在原点处切线的斜率作为弹性模量。应力-应变曲线上最大的应力值称为极限强度或拉伸强度。这一性质在工程设计中用处不大。因为在到达极限强度之前材料已发生了相当大的塑性形变。塑性形变在多数情况下等同于材料的破坏，但在少数情况下是有利的，如汽车保险杠。

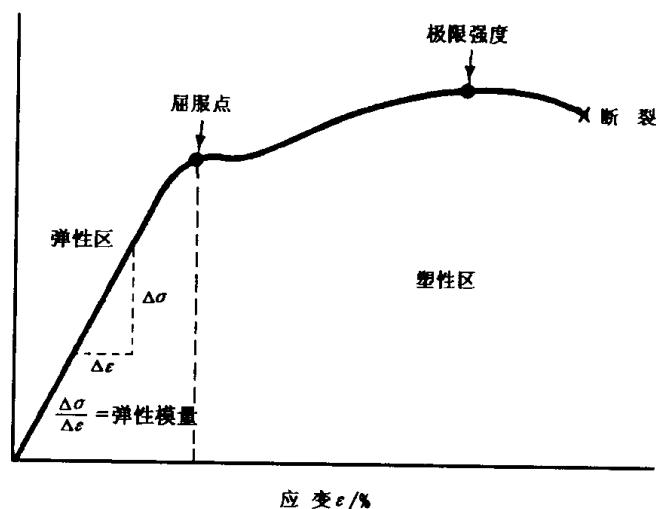


图 2-4 低碳钢的应力-应变曲线

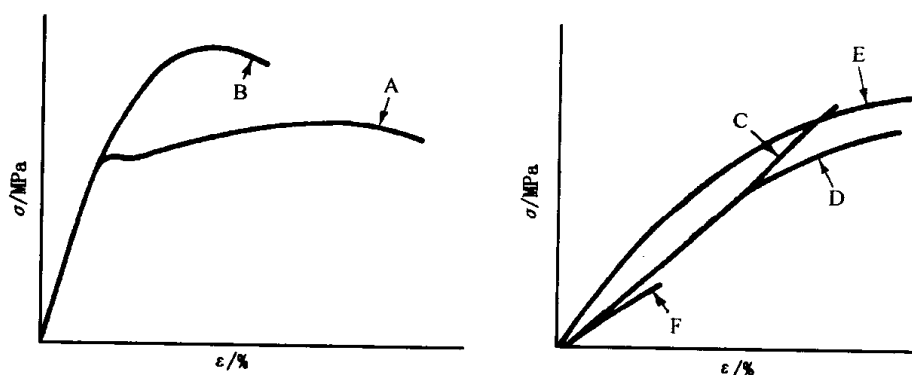


图 2-5 一些材料的应力-应变曲线

A—低碳钢 B—中碳钢 C—熟石膏 D—碳化钨
E—灰铸铁（压缩） F—灰铸铁（拉伸）

在工程设计中常使用的是屈服强度，即屈服点的应力。在理论上屈服点是弹性形变与塑性形变的分水岭，是应力不随应变的发展而显著增加的起始点。但实际上像低碳钢那样具有清晰屈服点的材料并不多见。这样如何确定屈服强度就成了一个问题。在实际应用中，允许有 0.2% 的塑性形变。所以约定在发生 0.2% 塑性形变处的应力为屈服强度。为区别于理论屈服强度，这样约定的屈服强度称为偏屈服强度。图 2-6 为铝合金的典型的应力-应变曲线。从曲线上看不到屈服点，图中表示了确定偏屈服强度的方法。

延展性是材料发生塑性形变而不断裂的度量。可以用断裂伸长率表示材料的延展性：

$$\epsilon = \frac{l_f - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (2-4)$$

式中， l_f 为样品断裂时刻的有效长度。表示延展性的另一方法是利用样品截面积的变化：

$$R = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100\% \quad (2-5)$$

式中， A_f 为样品断裂时刻的截面积。设计人员希望部件过度受力时能够在断裂前先发生一些塑性形变，而加工人员希望材料能被制成任意复杂的形状，因而延展性对材料是十分重要的。

工程应力-应变曲线上应力在达到最大值后发生下降是工程应力的定义造成的。我们始终将样品的初始截面积作为样品的截面积，而实际上样品的截面积是不断缩小的。在韧性材料的拉伸过程中，会有一个局部发生较大的截面积收缩，使样品的截面积尺寸变得不均匀，这个局部称为细颈。在其后的形变过程中，细颈部分的长度持续延伸，而截面积保持不变。由于我们始终将初始截面积作为样品的截面积，细颈部分所承受的应力要远大于工程应力所反映的值。为了解样品真实的应力与应变状态，就必须使用真应力与真应变，这两个量可定义如下：

$$\text{真应力: } \sigma_t = \frac{F}{A} \quad (2-6)$$

$$\text{真应变: } \epsilon_t = \int \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \frac{A_0}{A} \quad (2-7)$$

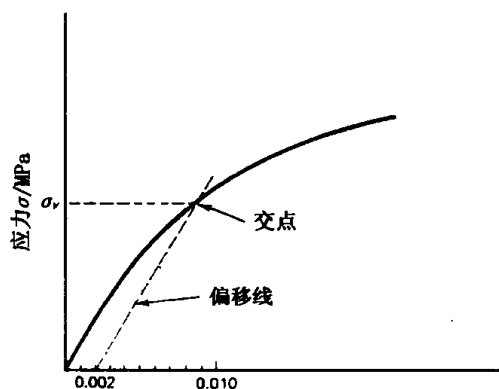


图 2-6 决定偏屈服强度的方法

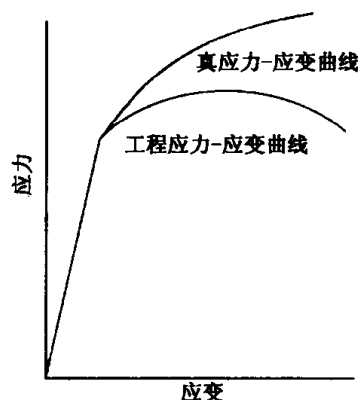


图 2-7 真应力-应变曲线
与工程曲线的对比

式中 A 为真实的或瞬时的样品截面积。图 2-7 中将真应力-应变曲线与工程曲线进行了对比。真应力-应变曲线中的应力持续上升，这是因为虽然塑性形变时所需的外力变小，但样品的截面积也变得很小，应力一直增长，直至断裂。真应力-应变曲线在实际应用中意义不是很大。这是因为在屈服点之后部件发生塑性形变，我们认为它已经被破坏了。

【例 2-1】设计一铝棒以承受 200kN (0.2MN) 的力。为确保安全，棒上最大应力不能超过 170MPa。棒的长度至少为 3.8m，受力时弹性形变不能超过 6mm。所用铝材的弹性模量为 69GPa。

解：先利用工程应力的定义计算棒的截面积：

$$A_0 = \frac{F}{\sigma} = \frac{0.2\text{MN}}{170\text{MN/m}^2} = 1.18 \times 10^{-3}/\text{m}^2 = 1180\text{mm}^2$$

只要保证截面积，可以为任何形状。为方便起见，设计一圆棒，其直径为 d ：

$$A_0 = \frac{\pi d^2}{4} = 1180\text{mm}^2 \quad \text{即} \quad d = 38.8\text{mm}$$

最大容许弹性形变为 6mm，而 170MPa 应力所对应的应变约为 0.0025，由工程应变的定义可确定棒的最大长度：

$$\epsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{6}{l_0} = 0.0025 \quad \text{即} \quad l_0 = 2400\text{mm} = 2.4\text{m}$$

但规定的最小长度为 3.8m。加长棒的长度，截面积必须随之变大。3.8m 长的棒的最小应变为：

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{6}{3800} = 0.00158$$

这一应变相应于 110MPa 的应力，小于最大应力 170MPa。则最小截面积为：

$$A_0 = \frac{F}{\sigma} = \frac{0.2\text{MN}}{110\text{MN/m}^2} = 1.82 \times 10^{-3}/\text{m}^2 = 1820\text{mm}^2$$

所以，为同时满足最大应力最小伸长两项条件，棒的截面积至少为 1820mm²，即直径至少 48mm。

2.1.2 剪切强度与挠曲强度

剪切力是指一对大小相等，方向相反，不作用于一条直线上的力，如图 2-8 (a) 所示。剪应力则是单位面积所受的剪切力： $\tau = \frac{F}{A_0}$ 。与拉伸应力不同的是剪切应力的受力面平行于作用力，而前者的受力面垂直于作用力。在剪切力的作用下，材料发生扭曲，而不是变长或变短。剪切应变定义为材料形变量与作用力之间距离之比： $\gamma = \frac{\delta_s}{h}$ ，见图 2-8 (a)。从图中可以看出，剪切应变恰好是材料形变角的正切。进行剪切测试也能得到应力-应变曲线。剪切应力-应变曲线与拉力下的应力-应变曲线基本一样，也是先有一段直线，直线的斜率称为剪切模量 G 。

$$G = \tau / \gamma \quad (2-8)$$

虎克定律对剪切力同样适用。材料受剪切力后断裂的情形见图 2-8 (b)。

延展性材料的应力-应变曲线一般都出现一个应力的最大值，这个最大值就是材料的拉伸强度。而较脆材料的断裂就发生在最大应力处，断裂强度与拉伸强度合二为一。陶瓷一类非常脆的材料，屈服强度、拉伸强度和断裂强度都重合于一点。

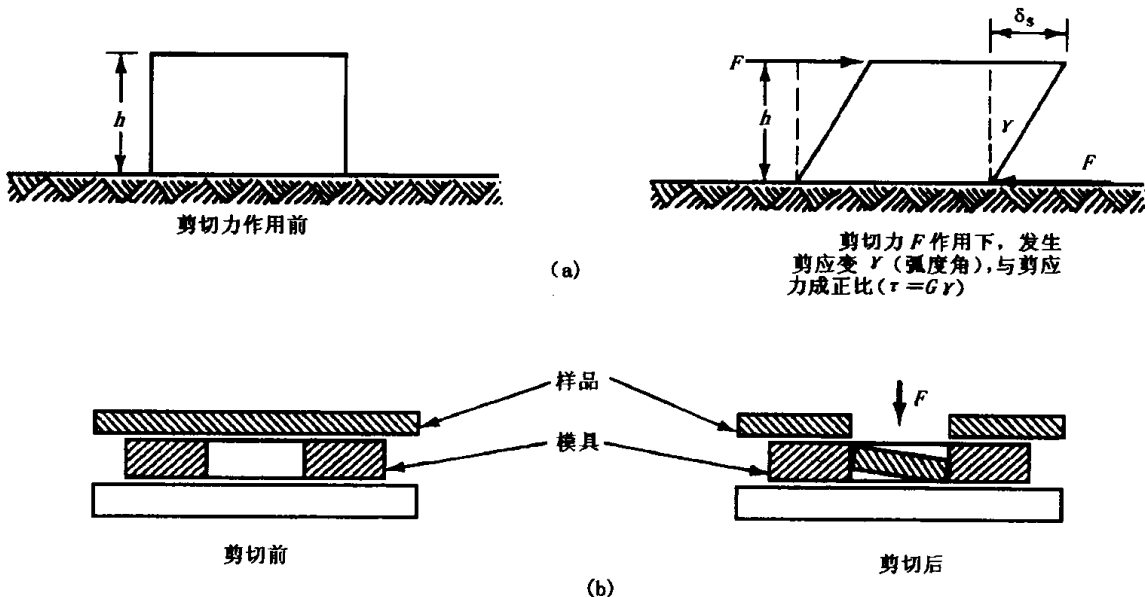


图 2-8 (a) 剪切力的定义；(b) 材料受剪切力的情形

有些脆性材料无法进行正常的拉伸测试。由于表面裂缝太多，刚把样品放上夹具就会引起开裂。这种材料只适合进行弯曲测试，如图 2-9。让材料在三点上受力，引起弯曲，用挠曲强度与挠曲模量对材料进行描述。