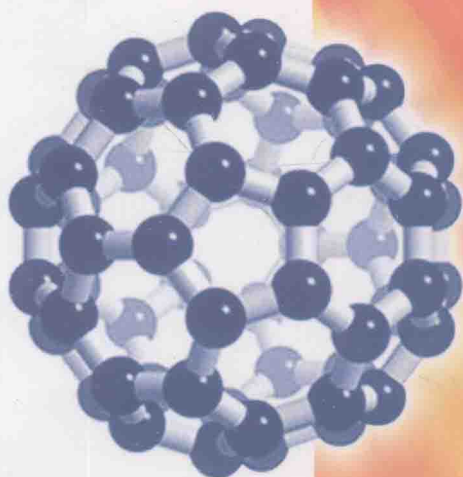


高等教育材料科学与工程专业规划教材

无机材料性能

WUJI CAILIAO XINGNENG

● 主编 周颖 贾晓林 鲁占灵



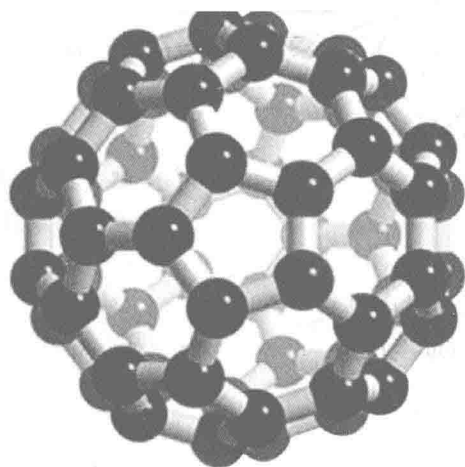
郑州大学出版社

高等教育材料科学与工程专业规划教材

无机材料性能

WUJI CAILIAO XINGNENG

○ 主编 周颖 贾晓林 鲁占灵



郑州大学出版社

郑州

图书在版编目(CIP)数据

无机材料性能/周颖,贾晓林,鲁占灵主编. —郑州:郑州大学出版社,2015. 12

ISBN 978-7-5645-2680-1

I. ①无… II. ①周…②贾…③鲁… III. ①无机材料-性能
IV. ①TB321

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 276453 号

郑州大学出版社出版发行

郑州市大学路 40 号

出版人:张功员

全国新华书店经销

郑州市诚丰印刷有限公司印制

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:18.25

字数:435 千字

版次:2015 年 12 月第 1 版

邮政编码:450052

发行部电话:0371-66966070

印次:2015 年 12 月第 1 次印刷

书号:ISBN 978-7-5645-2680-1

定价:36.00 元

本书如有印装质量问题,请向本社调换

前言

《无机材料性能》系统地阐述了无机非金属材料的各种物理性能,包括力学性能、热学性能、导电性能、介电性能、磁性能、光性能及材料的功能转换性能。作为材料科学与工程四个基本要素(basic elements)之一,材料性能是材料研究的根本目标和最终目的,是材料在工程应用、构件设计、科学研究等方面的计算依据,也是材料加工工艺选择的主要依据。

本书主要介绍了各种性能参数物理意义、单位及这些性能参数在实际问题中的应用和所处的地位,各种重要性能的原理和微观机制,性能参数与材料组成、结构与材料加工制备工艺的关系,各性能之间的相互制约与相互转换,以及不同材料的性能特点。无机非金属材料专业的本科学生通过对以上知识的掌握,可以为判断各种材料性能特点、正确选择和使用材料、优化材料性能、探索新材料打下坚实的理论基础。

本书共分7章,郑州大学材料科学与工程学院的许多老师参与了本书的编撰工作。其中,绪论由贾晓林老师编写,第1章材料力学性能由周颖老师编写,第2章材料热学性能由朱玲玲老师编写,第3章材料导电性能、第4章材料介电性能由王宇老师编写,第5章材料磁性能、第6章材料光学性能由张宗涛老师编写,第7章材料功能转换性能由鲁占灵老师编写。全书由郑州大学周颖副教授统稿,由郑州大学贾晓林教授审阅,在本书撰写和出版过程中,得到郑州大学材料科学与工程学院和郑州大学出版社的大力支持,在此一并表示衷心的感谢。

由于学识和经验所限,书中疏漏和错误在所难免,敬请各位读者批评指正。

编者

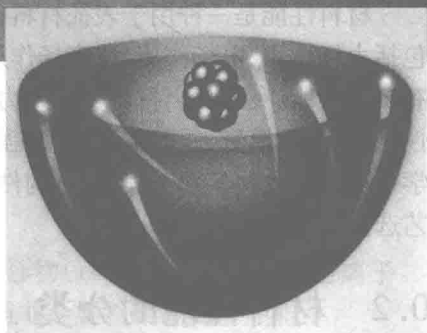
2015年5月

目 录

绪论	1
0.1 材料性能的定义	2
0.2 材料性能的分类	2
0.3 材料性能的影响因素	2
1 材料力学性能	9
1.1 应力与应变	10
1.2 材料的弹性	14
1.3 材料的塑性	27
1.4 材料的断裂与强度	38
1.5 材料的断裂韧性	47
1.6 材料的硬度	56
1.7 材料的疲劳	63
1.8 材料的蠕变	72
2 材料热学性能	81
2.1 热学性能的物理基础	82
2.2 热容	88
2.3 热膨胀	96
2.4 热传导	103
2.5 热稳定性	113
3 材料导电性能	123
3.1 固体中电子的能量结构	124
3.2 电导的物理现象	135
3.3 电子电导	139
3.4 离子电导	153
3.5 电导功能材料简介	161

4	材料介电性能	173
4.1	介电性	174
4.2	压电性	189
4.3	热释电性	195
4.4	铁电性	198
5	材料磁性能	209
5.1	磁学基本量与磁性分类	210
5.2	物质的磁本质	213
5.3	铁磁性特点	220
5.4	磁性材料的动态特征	227
5.5	磁性材料的应用	232
6	材料光学性能	239
6.1	光与固体的相互作用	240
6.2	材料对光的吸收	243
6.3	材料对光的散射	248
6.4	材料的光反射	251
6.5	材料的光透射	253
6.6	材料的光折射	258
6.7	材料的发光	260
6.8	光学材料简介	262
7	材料功能转换性能	271
7.1	热电性能	272
7.2	光电性能	276
7.3	电光效应	281
7.4	磁光效应	282
	参考文献	285

绪论



材料科学与工程主要研究有关材料组成、结构、制备工艺流程与材料性能和用途关系的知识的产生及其运用,换言之,材料科学与工程主要研究材料组成、结构、生产过程、材料性能与使用效能以及它们之间的关系。其中,组成与结构 (composition - structure)、合成与生产过程 (synthesis - processing)、性质 (properties) 及使用效能 (performance) 称为材料科学与工程的四个基本要素 (basic elements), 四个基本要素连续在一起,便形成一个四面体 (tetrahedron)。其中材料的性能和使用效能是材料研究的根本目标和最终目的。

0.1 材料性能的定义

材料性能是一种用于表征材料在给定外界条件下的行为参量。所谓给定外界条件,包括力场作用、电场作用、温度场作用、磁场作用、电磁波作用等。有多少外界条件就对应有多少性能。例如,当材料受到外力作用时,会发生变形和断裂并表现出各种各样的力学性能,如弹性模量、屈服强度、断裂强度、断裂韧性、伸长率和断面收缩率等,而这些材料力学性能指标是材料在工程应用、构件设计、科学研究等方面的计算依据,也是材料加工工艺选择的主要依据。

0.2 材料性能的分类

根据材料性能的定义可知,给定不同的外界条件下,材料有不同的行为参量。为了学习和研究的方便,材料性能一般可分为力学性能、物理性能、化学性能和工艺性能四大类,每一类又可分为多种性能。

- 力学性能:弹性、塑性、韧性、强度、硬度、高温蠕变性、耐磨性。
- 物理性能:电学性能、热学性能、磁学性能、光学性能、声学性能、功能转换性能。
- 化学性能:抗氧化性、耐腐蚀性、抗老化、应力腐蚀性。
- 工艺性能:可铸性、可锻性、可泵性、切削加工性。

所有这些性能既有区别又有联系,有些复杂性能是简单性能的组合。如材料的高温蠕变性是指材料在高温下的力学行为;材料的应力腐蚀是指材料在腐蚀环境下的力学行为,这些力学行为参量不是在一种外界条件下的反应,而是在两种甚至多种外界条件下材料的综合表现。

0.3 材料性能的影响因素

决定材料性能的根本因素是什么?根据材料科学与工程的基本定义可知:决定材料性能的内因是组成与结构;合成与生产过程是外因,通过内因起作用;同时,材料的使用性能与环境具有相关性。

0.3.1 组成与结构(内因)

材料组成是指构成材料的基本单元的成分及数目,材料结构则是指材料的组成单元(即原子或分子)之间相互吸引和相互排斥作用达到平衡时空间的几何排列。材料的组成与结构不同,则材料性能迥异。下面以金属材料、无机非金属材料、有机高分子材料为例来阐述组成与结构对材料性能的决定性影响。

金属材料:通常是指由化学元素周期表中的金属元素组成的材料。金属材料可分为由一种金属元素构成的单质(纯金属),由两种或两种以上金属元素或金属元素与非金属元素构成的合金,化学键以金属键为主,无方向性、饱和性。它们含有大量的自由电子,这

些自由电子不属于任何特定的原子,而金属材料的许多性能都来自这些电子的作用,这些组成与结构的特点决定了金属材料有如下性能:

- 常规方法生产的金属为晶体结构;
- 在常温下一般为固体,熔点较高;
- 具有金属光泽;
- 纯金属范性大,展性、延性也大;
- 强度较高;
- 自由电子的存在,金属的导热和导电性好;
- 多数金属在空气中易被氧化。

无机非金属材料:是指金属元素和非金属元素的化合物(compound),化学键为离子键、共价键的混合键。这些组成与结构的特点决定了无机非金属材料有如下性能:

- 硬而脆、韧性低、抗压不抗拉、对缺陷敏感;
- 熔点较高,具有优良的耐高温、抗氧化性能;
- 自由电子数目少、导热性和导电性能较小;
- 耐化学腐蚀性好;
- 耐磨损;
- 成型方式为粉末制坯、烧结成型。

有机高分子材料:是以 C、H、N、O 等元素为基础,由许多结构相同的子单位(链节)重复连接组成的,含有成千上万个原子,相对分子质量很大,并在某一范围内变化。结合键主要为共价键,并有部分范德华键。这些组成与结构的特点决定了有机高分子材料有如下性能:

- 相对分子质量大,无明显的熔点,有玻璃化转变温度、黏流温度;
- 有热塑性和热固性两类;
- 力学状态有玻璃态、高弹态和黏流态,强度较高;
- 质量轻;
- 良好的绝缘性;
- 优越的化学稳定性;
- 成型方法较多。

下面以神奇的碳材料为例,进一步加深了解材料结构对材料性能的影响。

自然界中碳的存在形式是多种多样的,有晶态单质碳,如金刚石、石墨;有无定形碳,如煤;有复杂的有机化合物,如动植物等;有碳酸盐,如大理石等。单质碳的物理和化学性质取决于它的晶体结构,如高硬度的金刚石和柔软滑腻的石墨晶体结构不同,各有各的外观、密度、熔点等。下面介绍不同结构单质碳的性能特点。

0.3.1.1 无定形碳

无定形碳又称为过渡态碳,是碳的同素异形体中的一大类,在碳素材料学历史上,曾与石墨、金刚石并立,被认为是碳元素三种存在状态之一。无定形碳的结构特点:C/H 原子比大于 10; X 光衍射图中的反射线模糊不清,从总体上看是非晶态的。但这类炭质材料,不像非晶金属那样形成完全杂乱无序的原子凝集体,即呈现所谓完全无定形。无定形

碳中还含有直径极小的($<30\text{ nm}$)二维石墨层面或三维石墨微晶,在微晶边缘上存在大量不规则的键。

总之不能用单一的结构模式来表征这一大类物质,用炭质材料或过渡态碳来表述比较合适。

无定形碳涉及的面很广,日常生活和工农业生产中常用到无定形碳,根据其性能特点主要有以下用途:

(1) 炭黑可用于制造油墨、油漆、墨汁等;

(2) 木炭可作燃料或还原剂,用于冶炼金属;

(3) 活性炭可作电冰箱的除臭剂、净水过滤器、防毒面具的滤毒罐、脱色剂等。它有吸附能力,把气体或溶液中的有色物质附在表面上,因而使其脱色。

(4) 焦炭可用作燃料和炼铁的还原剂。

0.3.1.2 石墨

石墨(图 0.1)是碳的另一种同素异形体,每个碳原子的周边联结着另外三个碳原子(排列方式呈蜂巢式的多个六边形)以共价键结合,构成共价分子。每个碳原子均会放出一个电子,那些电子能够自由移动。石墨晶体中层与层之间相隔 0.340 nm , 距离较大,是靠自由移动的电子产生的范德华力结合起来的,即层与层之间属于分子键。但是,由于同一平面层上的碳原子间结合很强,极难破坏,所以石墨的熔点很高,化学性质非常稳定。石墨由于其特殊结构,而具有如下特殊性质:

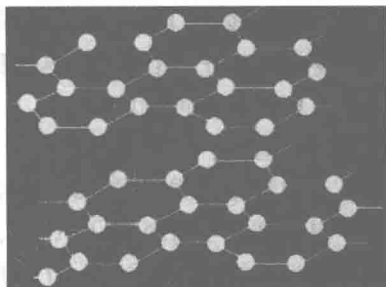


图 0.1 石墨

(1) 耐高温性:石墨的熔点为 $(3\ 850\pm50)^\circ\text{C}$, 沸点为 $4\ 250^\circ\text{C}$, 即使经超高温电弧灼烧,重量的损失很小,热膨胀系数也很小,石墨强度随温度提高而加强,在 $2\ 000^\circ\text{C}$ 时,石墨强度提高一倍。

(2) 导电导热性:石墨的导电性比一般非金属矿高一百倍。导热性超过钢、铁、铅等金属材料。导热系数随温度升高而降低,甚至在极高的温度下,石墨成绝热体。石墨能够导电是因为石墨中每个碳原子与其他碳原子只形成 3 个共价键,每个碳原子仍然保留 1 个自由电子来传输电荷。

(3) 润滑性:石墨的润滑性能取决于石墨鳞片的大小,鳞片越大,摩擦系数越小,润滑性能越好。

(4) 化学稳定性:石墨在常温下有良好的化学稳定性,能耐酸、耐碱和耐有机溶剂的腐蚀。

(5) 可塑性:石墨的韧性好,可碾成很薄的薄片。

(6) 抗热震性:石墨在常温下使用时能经受住温度的剧烈变化而不致破坏,温度突变时,石墨的体积变化不大,不会产生裂纹。

0.3.1.3 金刚石

在金刚石(图 0.2)晶体中,碳原子按四面体成键方式互相连接,组成无限的三维骨架,是典型的共价晶体。每个碳原子都以 SP_3 杂化轨道与另外 4 个碳原子形成共价键,构

成正四面体。而且,这种致密的结构,使得金刚石的密度为每立方厘米约 3.5 克,大约是石墨密度的 1.5 倍,正是这种致密的结构,使得金刚石具有最大的硬度。金刚石晶体的性能特点如下:

金刚石中的 C—C 键很强,所有的价电子都参与了共价键的形成,没有自由电子,所以金刚石晶体硬度大,熔点极高,而且不导电。在工业上,金刚石主要用于制造钻探用的探头和磨削工具。形状完整的还用于制造首饰等高档装饰品,其价格十分昂贵。

0.3.1.4 C_{60}

近年来,科学家们发现,除金刚石、石墨外,还有一些新的以单质形式存在的碳。其中发现较早并已在研究中取得重要进展的是 C_{60} 分子(图 0.3)。 C_{60} 分子是一种由 60 个碳原子构成的分子,它形似足球,因此又名足球烯。(C_{60} 这种物质是由 C_{60} 分子组成的,而不是由原子构成的) C_{60} 分子是单纯由碳原子结合形成的稳定分子,它具有 60 个顶点和 32 个面,其中 12 个为正五边形,20 个为正六边形。其相对分子质量约为 720。

C_{60} 的组成及结构已经被质谱仪、X 射线分析等实验所证明。此外,还有 C_{70} 等许多类似 C_{60} 的分子也已被相继发现。由于其结构的特殊性, C_{60} 物质具有以下特殊性能:

(1)增强金属:由于 C_{60} 比碳的颗粒更小、活性更高, C_{60} 与金属作用产生的碳化物分散体的颗粒大小是 0.7 nm,而碳与金属作用产生的碳化物分散体的颗粒大小为 2 ~ 5 μm ,在增强金属的作用上有较大差别。

(2)新型催化剂: C_{60} 具有烯烃的电子结构,可以与过渡金属(如铂系金属和镍)形成一系列络合物。

(3)气体的贮存:利用 C_{60} 独特的分子结构,可以将 C_{60} 用作比金属及其合金更为有效和新型的吸氢材料。每一个 C_{60} 分子中存在着 30 个碳—碳双键,因此,把 C_{60} 分子中的双键打开便能吸收氢气。

0.3.1.5 石墨烯

石墨烯(graphene)是一种由碳原子构成的单层片状结构的新材料,是一种由碳原子以 SP_2 杂化轨道组成六角型呈蜂巢晶格的平面薄膜,只有一个碳原子厚度的二维材料。石墨烯(图 0.4)一直被认为是假设性的结构,无法单独稳定存在,直至 2004 年,英国曼彻斯特大学物理学家安德烈·海姆和康斯坦丁·诺沃肖洛夫,成功地在实验中从石墨中分离出石墨烯,而证实它可以单

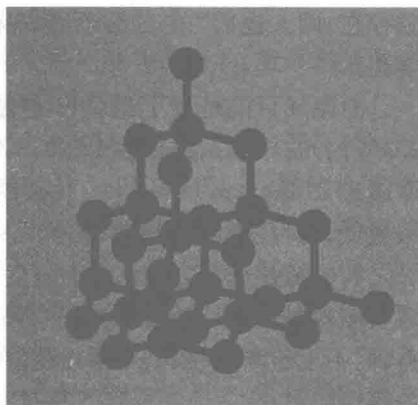


图 0.2 金刚石

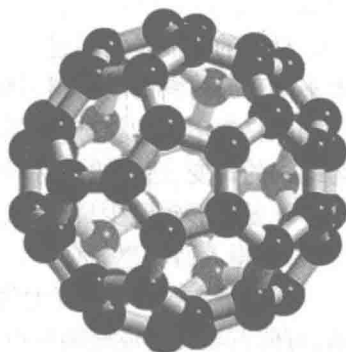


图 0.3 C_{60}

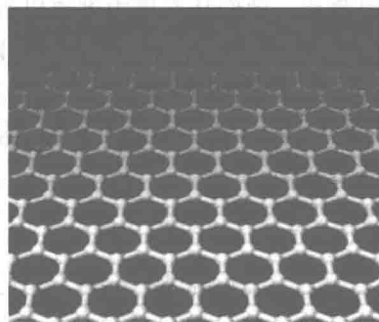


图 0.4 石墨烯

独存在,两人也因“在二维石墨烯材料的开创性实验”,共同获得 2010 年诺贝尔物理学奖。

石墨烯目前是最薄也是最坚硬的纳米材料,它几乎是完全透明的,只吸收 2.3% 的光;导热系数高达 $5\,300\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,高于碳纳米管和金刚石,常温下其电子迁移率超过 $15\,000\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$,比碳纳米管或硅晶体高,而电阻率只约 $10^{-6}\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$,比铜或银更低,为目前世上电阻率最小的材料。

石墨烯是迄今为止世界上强度最大的材料,据测算如果用石墨烯制成厚度相当于普通食品塑料包装袋厚度的薄膜(厚度约 100 nm),那么它将能承受大约两吨重物品的压力,而不至于断裂;根据石墨烯超薄、强度超大的特性,石墨烯可被广泛应用于各领域,比如超轻防弹衣,超薄超轻型飞机材料等。

0.3.2 合成与加工过程(外因)

材料的合成是指通过一定的途径,从气态、液态或固态的各种不同原材料中得到化学上不同于原材料的新材料。材料的加工则是指通过一定的工艺手段使新材料在物理上处于和原材料不同的状态(化学上完全相同)。通过材料合成与加工过程实现材料间组成与结构的转变,达到改变材料性能的目的。例如:

- 无定形碳跟少量砂子、氧化铁催化剂混合,在约 $3\,500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 中加热,使产生的碳蒸气凝聚,可得人造石墨。

- 石墨在 $5\text{ 万}\sim 6\text{ 万}$ 大气压及 $1\,000\sim 2\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温下,再用金属铁、钴、镍等做催化剂,可使石墨转变成金刚石粉末。

- C_{60} 是美国休斯敦赖斯大学的史沫莱(Smalley R. E.)等人和英国的克罗脱(Kroto H. W.)于 1985 年提出烟火法而正式制得的。他们用大功率激光束轰击石墨使其气化,用 1 MPa 压强的氦气产生超声波,使被激光束气化的碳原子通过一个小喷嘴进入真空膨胀,并迅速冷却形成新的碳分子,从而得到了 C_{60} 。 C_{60} 的组成及结构已经被质谱仪、X 射线分析等实验所证明。

- 石墨烯出现在实验室中是在 2004 年,当时,英国曼彻斯特大学的两位科学家安德烈·杰姆和克斯特亚·诺沃肖洛夫发现他们能用一种非常简单的方法得到越来越薄的石墨薄片。他们从石墨中剥离出石墨片,然后将薄片的两面粘在一种特殊的胶带上,撕开胶带,就能把石墨片一分为二。不断地这样操作,于是薄片越来越薄,最后,他们得到了仅由一层碳原子构成的薄片,这就是石墨烯。这以后,制备石墨烯的新方法层出不穷,经过 5 年的发展,人们发现,将石墨烯带入工业化生产已为时不远了。目前石墨烯的合成方法主要有两种:机械方法和化学方法。机械方法包括微机械分离法、取向附生法和加热 SiC 的方法;化学方法包括化学还原法与化学解理法。

0.3.3 环境相关性(相互作用)

20 世纪 90 年代初,在可持续性发展理论和应用的推动下,国际材料界出现了一个新的领域——环境与材料,要求在材料的研究和开发的过程中,既要追求良好的使用性能,又要深刻认识到自然资源的有限性和尽可能降低废弃物排放量,并在材料的提取、制备、

使用直到废弃与再生的整个过程中都尽可能地减少对环境的影响。

由于材料都是在某种背景下使用,脱离使用环境的材料是没有价值的,所以必须考虑环境对材料的性能的影响,最主要的两个环境因素是温度、介质。

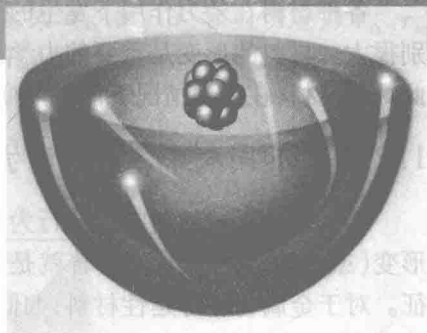
(1)温度环境:材料的所有性能都会随着温度的变化而变化,而有些性能会受到温度的强烈影响。如:在温度非常低时,钢出现冷脆现象;对于 Ni 基高温材料,使用温度在 $800 \sim 900\text{ }^{\circ}\text{C}$,当温度升高时性能会急剧下降;对于许多无机非金属材料,当温度发生剧烈变化时会出现热断裂和热损伤。例如航天飞机需要多次出入大气层,每次都会由于与空气的剧烈摩擦而产生大量气动加热,特别是以高超音速返回大气层时,气动加热会使其表面达到极高的温度。机头处温度约为 $1\ 800\text{ }^{\circ}\text{C}$,机翼和尾翼前缘温度约为 $1\ 460\text{ }^{\circ}\text{C}$,机身下表面约为 $980\text{ }^{\circ}\text{C}$,上表面约为 $760\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。因此,这么高的环境温度对材料的要求非常苛刻,必须考虑有一个重量轻、性能好、能重复使用的材料隔热系统。如机头与机翼等温度最高的部位,要求采用碳复合材料,这种复合材料表面有碳化硅涂层,重量轻,耐高温性能好。

(2)腐蚀介质:材料与环境发生相互作用而破坏的性质称为腐蚀。腐蚀根据环境的不同分为大气腐蚀、土壤腐蚀、海水腐蚀、熔融介质腐蚀、化工介质腐蚀。腐蚀现象的发生直接导致材料性能的下降,构件失效,并造成巨大的经济损失。材料都是在一定环境下使用的,腐蚀介质对材料的作用是不可避免的。如混凝土材料在一般环境下使用良好,但在海水腐蚀介质中性能显著下降。人类已进入海洋开发的新时代,海洋资源的开发、海上运输、海港和海防建设等都需要大量新型材料,研究海洋腐蚀性介质材料的制备、工艺、失效机制,探索未来海洋开发所需要的新材料格外重要和迫切。又如金属材料是性能良好的结构材料,但当受周围介质作用而腐蚀时,在金属的界面上发生了化学或电化学多相反应,这会显著降低金属材料的强度、塑性、韧性等力学性能,破坏金属构件的几何形状,增加零件间的磨损,恶化电学和光学等物理性能,缩短设备的使用寿命。

总之,材料的性质是由其使用要求(环境)提出的,材料的性质是由其组成与结构所决定的,材料的组成与结构是由原料和制备工艺所决定的,只有深刻理解其原理并运用到材料研究和制备过程中,才能创造出具有各种性能的新材料,使材料在现代工业和科学技术上获得广泛应用。因此,深入了解和研究材料的各种物理化学性质,已成为当代材料科学的主要研究内容,也是发展无机材料的主要途径。



材料力学性能



材料力学性能是指材料在外力作用下的行为,其重要的力学性能包括强度、硬度、弹性、延性和韧性等。力学性能是人类最早开始利用和使用的性质,如石器时代人们利用天然岩石的强度和硬度;青铜器时代利用铜的高塑性和高强度及加工硬化性能;在铁器时代更是利用Fe-C合金的高强度、硬度和塑性。而人类真正认识和系统地理解材料的力学性质始于19世纪中叶。当时转炉和平炉炼钢相继问世,钢铁开始大规模生产,为了更好地控制钢铁的质量,人们开始利用金相显微镜对材料细微结构组织进行了研究,并且确定了一些重要的物相以及这些物相与产品力学性能的关系。目前对三大类材料的分类也是基于其力学性能的不同,如金属具有延展性,陶瓷硬而脆,橡胶具有很大的弹性形变。而当未来材料向耐高温、低密度、高比强、高比模、高硬度等方向发展时,更需要对材料的力学性能作深入的理解。

本章主要介绍材料力学性能的主要指标以及这些指标的物理意义,并且讨论材料形变的基本规律以及与材料组织结构的关系,进一步探讨影响材料力学性能的因素以及提高材料力学性能的途径。

1.1 应力与应变

各种材料在外力作用下发生的形状和大小的变化,称为形变,不同材料的变形行为差别很大。材料的形变是重要的力学性能,与材料的制造、加工和使用都有密切的关系。因此,研究材料在受力情况下产生形变的规律具有重要的意义。

1.1.1 不同材料变形行为

绝大多数无机材料的变形行为如图 1.1 中曲线(a)所示,即在弹性变形后没有塑性形变(或塑性形变很小),接着就是断裂,总弹性应变能非常小,这是所有脆性材料的特征。对于金属材料等延性材料,如低碳钢,开始为弹性形变,接着有一段弹塑性形变,然后才断裂,总变形能很大,如图中曲线(b)所示。橡皮这类高分子材料具有极大的弹性形变,如图中曲线(c)所示,是没有残余形变的材料,称为弹性材料。

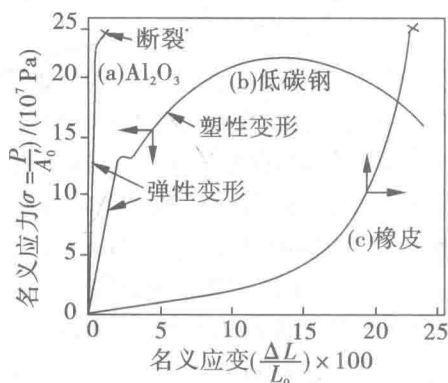


图 1.1 不同材料的拉伸应力-应变曲线

1.1.2 应力

1.1.2.1 应力的定义

材料发生宏观形变时,其内部分子间或离子间的相对位置或距离会发生变化,同时产生原子间及分子间的附加内力而抵抗外力,并试图恢复到形变前的状态,当达到平衡时,根据力的平衡原理,附加内力与外力大小相等且方向相反。

应力是指材料单位面积上所受的附加内力,其值等于单位面积上所受的外力。

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1.1)$$

式中: σ 为应力; F 为外力; A 为受力面积。在国际单位制中,应力的单位为牛顿/米² (N/m²)或帕(Pa)。

若材料受力前的面积为 A_0 ,则 $\sigma_0 = F/A_0$ 称为名义应力;若受力后的面积为 A ,则 $\sigma = F/A$ 为真实应力。实际中常用名义应力,对于形变量小的材料,两者数值上相差不

大,只有在高温蠕变情况下,两者才有显著差别。

1.1.2.2 应力的分解

如果围绕材料的内部某点取一体积元如图 1.2 所示,其 6 个面均垂直于坐标轴 x 、 y 、 z ,则作用在该体积元单位面积上的力可分解为法向应力 σ_{xx} 、 σ_{yy} 、 σ_{zz} 和剪切应力 τ_{xy} 、 τ_{xz} 、 τ_{yx} 、 τ_{yz} 、 τ_{zx} 、 τ_{zy} 等。每个面上有一个法向应力和两个剪应力。

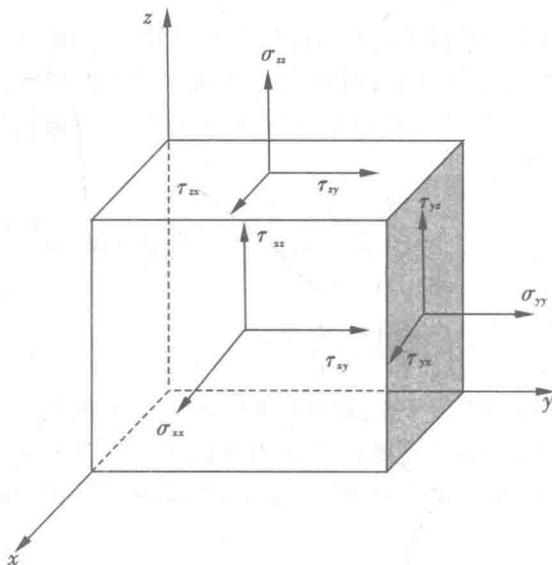


图 1.2 应力的分解

应力分量下标的含义:应力分量 σ 和 τ 下标的第 1 个字母表示应力作用面的法线方向,第 2 个字母代表应力作用的方向。

应力分量的正负号规定:应力的正负号规定是拉应力(张应力)为正,压应力为负;剪切应力的正负号规定是体积元上任意面上的法向应力与坐标轴的正方向相同,则该面上的剪切应力指向坐标轴的正方向者为正;如果该面上的法向应力指向坐标轴的负方向,则剪切应力指向坐标轴的正方向者为负。根据上述规定,图 1.2 所表示的所有应力分量都是正的。若用张量表示,应力张量可写为:

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

1.1.2.3 平衡条件

法向应力导致材料的伸长或缩短,而剪切应力引起材料的切向畸变。根据平衡条件,体积元上相对的两个平行平面上的法向应力应该大小相等、正负号相反,同一平面上的两个剪切应力互相垂直。根据剪切应力互等原理可知: $\tau_{xy} = \tau_{yx}$,其余类推,故一点的应力状态可化简为 6 个应力分量 σ_{xx} 、 σ_{yy} 、 σ_{zz} 、 τ_{xy} 、 τ_{yz} 、 τ_{zx} 来决定。