

绪 论

0.1 建筑材料-人类-环境的关系

建筑材料是人类建造活动所用一切材料的总称。人类社会的基本活动——衣食住行,无一不是直接或间接地和建筑材料密切相关的。早在远古,人类就直接使用天然资源作为建筑材料,如块石、泥土、树枝和树叶,以及经过简单加工的材料,如夯土、草泥、巢穴等;而将天然资源进行不同程度深加工,生产出来的建筑材料,也就成为古代与现代人类建造各种类型建筑物的基础。

我国古代悠久的历史 and 劳动人民的智慧,巧妙地运用和加工天然的建筑材料,建造出当时最高水平并且流传至今的建筑结构,是不乏其例的。其中最为雄伟和壮观的建筑工程当属万里长城。根据历史记载,有二十多个诸侯国家和封建王朝修筑过长城,其中秦、汉、明三个朝代所修长城的长度都超过一万里,总长度大约有十万里以上,所用的砖石土方量巨大,如果修一道宽 1m、高 5m 的大墙,可绕地球十几周!修筑长城的建筑材料,在没有大量用砖之前,主要是土、石和木料、瓦件等。需用的土、石量很大,一般都就地取材。在高山峻岭就地开山取石,用石块砌筑;在平原黄土地带则就地取土,用土夯筑;在沙漠地区还采用芦苇或红柳枝条层层铺砂的办法来修筑。明朝的长城在许多重要地段采用了砖石垒砌城墙,除土、石、木料外,还需用大量砖和石灰。不但修得坚固,而且关外有关、城外有城,长城沿线修建了许多城堡和烽火台,把它和首都以及重要州、县形成一个有机的军事防御工程体系。其材料运输量之浩大、工程之艰巨世所罕见,充分体现了我国古代建筑工程的高度成就,表现出了我国古代劳动人民的聪明才智。

河北赵州石桥建于 1300 多年前的隋代,桥长约 51m,净跨 37m,拱圈的宽度在拱顶为 9m,在拱脚处为 9.6m。建造该桥的石材为青白色石灰岩,石质的抗压强度非常高(约 100MPa)。它虽然比最早建设石拱桥的意大利人(在公元 138 年建造了三孔跨度为 18m 的 Saint Ange 桥)晚了 400 多年(据北魏地理学家郦道元所著书记载:早在西晋太康三年——公元 282 年,在洛阳附近曾建造一座石拱桥,工程浩大,但可惜今已无存),但该桥在主拱肋与桥面之间设计了并列的四个小孔,挖去部分填肩材料,从而开创了“敞肩拱”的桥型。拱肩结构的改革是石拱建筑史上富有意义的创造,因为挖空拱肩不仅减轻桥的自重、节省材料、减轻桥基负担,使桥台可造得轻巧,并直接建在天然地基上,亦可使桥台位移很小,地基下沉甚微,且使拱圈内部应力很小,这是该桥使用千年却仅有极微小的位移和沉陷,至今不坠的重要原因之一。经计算发现由于在拱肩上加了四个小拱并采用 16~30cm 厚的拱顶薄填石,使拱轴线(一般即工圈的中心线)和恒载压力线甚为接近,拱圈各横截面上均只受压力或极小拉力。赵州桥结构体现的二线要重合的道理,直

到现代才被认识。自 1883 年起,法国人和卢森堡人才开始建造敞肩石拱桥,比我国的赵州桥晚了 1 200 多年。

自 18 世纪以来,西方工业国发明出种种现代建筑材料,从钢材、水泥混凝土、钢筋与预应力混凝土,到近三四十年以来出现的纤维增强水泥基材料和纤维增强塑料、彩板轻钢、建筑膜等。新建筑材料的涌现为基础设施建设,包括道路、桥梁、铁路、机场和港口等交通设施和水利灌溉、给排水及居住建筑、通信等的迅速发展奠定了基础,从而也为人类社会自 20 世纪,尤其是二次世界大战后的半个世纪以来,世界人口的膨胀与工业化、城市化的高速度发展,起了重要的促进作用。至 1995 年,全世界的钢产量达到 7.7 亿 t、水泥 11.5 亿 t,混凝土使用量约 70 亿 t。

但是,建筑材料的生产消耗了大量自然资源,例如冶炼钢铁要采掘铁矿石;生产水泥要消耗石灰石和粘土类原材料,占混凝土体积大约 70% 的砂石骨料要开山与挖掘河床,严重破坏了自然景观与生态环境;木材取自森林资源,森林面积的减少加剧了水土流失和土地的沙漠化,目前我国每年约有 2 100 km² 的土地沦为沙漠;烧制粘土砖要取土毁掉大片农田,我国每年烧砖毁田达 8 000 km²,是人均占有耕地逐年下降的重要原因之一。与此同时,建筑材料的生产还要消耗大量能源,并产生废气、废渣,对环境构成污染。如冶炼 1 t 钢折合标准煤 1.66 t、耗水 48.6 m³;烧制 1 t 水泥熟料耗标准煤 178 kg,同时放出约 1 t 二氧化碳;建筑材料的运输和使用过程,也要消耗能源并污染环境。目前我国每平方米建筑面积的材料运输重量为 1.2~1.3 t。

然而,建筑材料的生产同时又是可以利用和消纳许多工、农业废料的大宗产业。例如热电厂排放的粉煤灰(目前我国年排量超过 1.5 亿 t)、高炉炼铁排放的矿渣(目前我国年排量约 1 亿 t)以及冶炼铝、铜、生产黄磷(磷肥工业原料)和农产品的秸秆、谷壳等。

综上所述,建筑材料是人类与自然环境之间的重要媒介,直接影响人类的生活与社会环境。在今天,人类大量建造的基础设施对生存环境发挥着巨大的积极作用,同时也带来不容忽视的消极作用,即大量地消耗地球的资源 and 能源,在相当程度上污染了自然环境和破坏了生态平衡。因此,从人类社会可持续发展的前景出发,建筑材料也要注意可持续发展的方向。近年来提出的发展“绿色建筑材料”或“生态建筑材料”正是上述出发点的集中体现。它不仅与生产建筑材料的人们相关,而且要贯穿从生产到使用的全过程,还包括材料的再循环使用问题等。

0.2 建筑材料与工程结构的关系

1. 新型建筑材料与工程结构的发展

建筑材料的更新是新型结构出现与发展的基础。在古代,建筑材料主要是砖石,公元 125 年古罗马建造的万神殿,直径为 44 m 的半球形屋顶,用了 12 000 t 材料;水泥的发明,推出钢筋混凝土,1912 年波兰的布雷劳斯市建造了一直径为 65 m 的世纪大厅,采用钢筋混凝土肋形拱顶,重量只有 1 500 t;随着建筑技术的发展,钢筋混凝土薄壁构件出现,墨西哥洛司马南什斯饭店采用了双曲抛物面薄壳屋盖,直径 32 m,厚度 4 cm,重量只有 100 t;随着材料科学技术的发展,1977 年德国斯图加特市联邦园艺展览厅,采用玻璃纤维增强水泥的双曲抛物面屋盖,厚 1 cm、直径 31 m,重量只有 25 t;近些年出现采用厚为 1 mm 的薄钢板,在现场加工成大跨度的彩板轻钢屋面,重量进一步减轻;而用厚度仅为 0.2 mm 的建筑膜搭建起新型的膜结构,每平方米重量仅 20 kg。新的轻质高强材料不断地涌现,为结构向大跨度、轻型化和新型

结构形式发展提供了前提条件。

2. 结构与材料实验

结构与材料实验在传统上两者是互相分离的,前者的工作看上去主要是分析计算,近些年来集中体现在运用计算机技术上;而后者则似乎只是反复地加工大量试件,再用实验机把它们破坏。两者之间的关系好像仅仅是后者为前者提供设计必要的数据而已。有些结构工程师认为:只要有各种规范、手册在手,就能够做好设计工作。

事实上,任何建筑材料的使用效果,都与它所应用的结构形式、部位、施工时的环境等许多因素息息相关。因而在设计一座新型的结构物或者对工程环境不熟悉的情况下,靠查阅规范、手册来选用建筑材料是远远不够的。况且从规范、手册上能查到的数据,都是已经在工程中广泛应用,积累了丰富实践经验的材料,至于新材料,在工程中尚未广泛应用的材料,是没有现成数据可供参考的。这就要靠设计者依据所掌握的建筑材料基本知识,加上收集有关新材料的信息,才能够使设计上的新构思,施工上的新工艺、新技术与新材料很好地结合,获得预期的效果。

3. 施工是结构与建筑材料之间的桥梁

施工是运用建筑材料实现设计意图的中间环节,同时也是建筑材料生产过程的最终环节(也就是说:建筑材料运抵现场,经过施工和再加工过程,例如混凝土的浇筑、振捣密实和养护,钢筋的绑扎、连接等,才成为结构的一部分)。因此,施工既是结构设计得到充分体现的必要保证,也是建筑材料使用性能能够正常发挥的重要保证。换句话说,施工对结构工程质量的影响重大,同样是合格的建筑材料,因为操作不当常常造成不符合使用要求的结果。由此看来,不仅结构与建筑材料之间的关系密切,从事工程管理的工程师不仅要熟悉结构设计,也需要十分熟悉建筑材料,才能做好管理工作。

0.3 建筑材料的组成、结构与性能

为了对不同材料的结构与性能特点进行比较,以加深理解,本书对每种材料的叙述都尽量按照相同的顺序:组成—结构—性能—生产与加工。

要合理地选用材料,就必须对不同材料进行比较,了解各种材料的特性,包括强度与破坏特性、变形性能、耐久性能等多方面。

首先,材料必须具备足够的强度,不仅要安全地承受设计荷载,而且由于强度提高可减轻其自重,减小下部结构和基础的负荷,从而使整个结构断面的尺寸减小,这说明:发展高强、轻质和高效能的新型材料,有重大技术和经济意义。

不同建筑材料变形性能大小的影响因素差异很大,例如:沥青主要受温度变化影响;而导致混凝土变形的因素则是水分的迁移。变形性能不仅影响材料的承载能力,而且因为变形受约束导致的开裂,对材料的耐久性也带来明显的影响。

耐久性是指建筑材料应用于结构物时,维持正常使用性能的能力。由于在严酷环境里各种基础设施建设的发展,例如沙漠、海洋中开采石油相关的设施,海洋与近海结构物等的建设和使用,对于材料在结构及其使用环境中的耐久性要求日益提高。

还有一些其他性能,例如:在需要尽快交付使用的时候,加快施工速度就成为决定性因素;经济性也常起决定作用,很多材料性能良好,但价格不能被广泛接受,因此长期得不到推广。在更高一个层次上,经济性要体现在延长工程结构物的使用寿命并尽量减少维修费用,从而降低年平均投资。

1. 分析材料的尺度

需要从不同的尺度去分析材料,从小到大分为分子尺度、材料结构尺度和工程尺度。

1) 分子尺度

从原子、分子尺度来分析材料,基本上属于材料科学的领域,这个范围粒子的大小约为 $10^{-7} \sim 10^{-3} \text{ mm}$,例如硬化水泥浆体中的硅酸钙水化物、氢氧化钙结晶等。

从本教材的第一章可以看到:利用已建立的原子模型可以描述材料的物理结构(无论是规则的还是紊乱的)以及材料的聚集方式,通过这些理论分析来认识材料的特性。

材料的化学成分起决定物理结构的重要作用。当化学反应不断地进行时,材料的物理结构也随时间不断发生变化。例如,水泥水化是一个缓慢的过程,随着时间的推移,水泥的结构和性能都相应发生变化;有些材料,例如金属,由于周围环境的影响,外界的氧和酸性介质与其发生反应的速度,决定了它们的耐久性。

材料的孔隙率大小,由化学和物理方面的很多因素所决定。砖、混凝土等多孔材料许多重要的性质,如强度、刚度等都与其孔隙率成反比($S = S_0 e^{-kp}$);其渗透性和孔隙率也有直接联系。

在这个尺度上,测定材料结构的实验技术已经相当先进,使用扫描电子显微镜、X射线衍射仪、热重分析等复杂的仪器,对金属的位错、水泥浆硬化时的收缩与开裂等很多现象,可以通过直接观测的结果进行分析,但是大多数情况下还需要通过建立数学、几何模型来推测材料的结构和可能呈现的特性。

在这个尺度上,只有断裂力学可以直接通过分子的行为分析材料的工程性质,多数情况下从这个尺度得到的信息还只能提供一些思路,用于分析和预测不同条件下材料的特性。

材料学家们对材料化学、物理结构的认识,则是开发新材料的重要途径之一。

2) 材料结构尺度

这个大一级的研究尺度把材料看作不同相的组合,相与相之间的相互作用使整体呈现出一定的特性。相可以是材料结构内许多可分的个体,如木材的细胞、金属的晶粒,或者由性质完全不同的几个相随机混合形成的混凝土、沥青、纤维复合材料,以及砌体中有规则的情况。这些材料通常是由大量颗粒,如骨料分散在基体(如水泥或沥青材料)中组成。单元大小从厚度只有 $5 \times 10^{-3} \text{ mm}$ 的木材细胞壁,到一块砖长达 240 mm 。

该尺度之所以重要,在于它比对材料整体进行测试得到的结果更具普遍性。通过建立多相组合模型,就可以预测常规实验范围以外的多相材料特性。模型的提出要注意:

(1) 几何形态。模型必须以颗粒(即分散相)分散在基体(也就是连续相)中的形式建立,要考虑颗粒的形状和大小分布,以及它们占总体积的比例。

(2) 状态与性质。各相的化学与物理状态和性质影响整体的结构和性能。例如材料的刚度取决于各个相的弹性模量,材料随时间发生的变形取决于各个相的粘度。

(3) 界面的影响。上述两方面得到的信息还不够充分。相与相之间存在界面,因此有可能会呈现与组成相的特性差异显著的结果,例如强度,材料的破坏常取决于界面粘结力的强弱。

从材料结构尺度进行研究,对以上三方面要有充分的了解,首先要对各个相进行实验,其次对界面进行实验。多相模型通常只用于加深了解,有时可经过简化用于实际,例如预测混凝土的弹性模量或纤维复合材料的强度等。

3) 工程尺度

这一尺度的研究对象是整个材料,所以前提是将材料看作均匀而连续的,通过研究获得材料整体的平均特性。人们对各种建筑材料的认识通常是基于工程尺度,本书讲述的内容也要归结到材料在工程尺度上呈现的特性。

从工程尺度去分析材料,其最小尺寸要由能代表其特性,即结构无序性的最小单元决定。单元的尺度从金属的 10^{-3}mm 到混凝土的 100mm ,乃至砌体结构的 $1\,000\text{mm}$ 不等。只要是体积大于单元体,所测得的数据对于该材料就认为可以普遍适用。

在实际应用中对有关材料性能的了解,通常来源于用其制备的试件放在和工程结构同等环境条件下进行实验得到的结果。实验有多种方式,根据得到的一系列图表或经验公式来表征其特性值随关键参数,如钢材含碳量、混凝土含水量以及沥青温度的变化而变化。在实验范围内推测,结果较为可靠,而利用外推法进行推测时可能会得出错误的结论。

2. 材料的变异性

上面提到,工程师要根据现行的标准选用材料。在比较各种材料的过程中,一个很重要的问题是材料本身的变异性。当然这取决于结构物所用材料的匀质性,而材料的均匀程度又取决于制造加工过程的工艺。钢材的生产已经比较完善,能够精确控制其过程,因此工程上所需的各种钢材可以迅速地、重现性良好地再生产,其强度等性能的变异性很小。反之,未经加工的木材存在很多缺陷,例如节疤,其性能的波动就很大。

材料很多特性的变异符合图 0-1 所示的正态分布曲线或高斯分布曲线。如果对大量相同的试件进行实验,例如强度,结果可以画成直方图。直方图可用哑铃形曲线方程表示

$$y = \frac{1}{\sigma_c \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(x - \bar{x})^2}{2\sigma_c^2} \right] \quad (0.1)$$

式中, y 为概率密度; x 为变量,如表示强度。这样强度就可以用两个数值表示:

(1) 平均强度 $\bar{x}$, 对 n 个试件

$$\bar{x} = \sum x/n$$

(2) 变化范围用标准差 σ_c 表示

$$\sigma_c = \sqrt{\sum \frac{(x - \bar{x})^2}{n-1}}$$

标准差的单位和变量相同,表示变量的变异性。在比较不同材料或者同种材料的不同品种时,常用无量纲的变异系数 C_v

$$C_v = \sigma_c / \bar{x}$$

对于可比性能,原木的变异性要比钢材高得多,因此它的变异系数就大。表 0-1 列出了一些典型材料的平均强度和变异系数,是通过同批材料的大量样品进行实验所得到的。

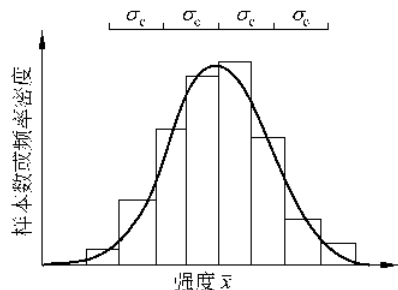


图 0-1 材料强度正态分布曲线

表 0-1 一些建筑材料的强度及其变异系数的比较

材 料	平均强度/MPa	变异系数/%	备 注
钢材	460(t)	2	结构低碳素钢
混凝土	40(c)	15	普通混凝土 28 天立方体强度
木材	30(t)	35	针叶木原材
	120(t)	18	无节疤、直纹针叶木
	11(t)	10	结构用木屑板
纤维水泥复合材料	18(t)	10	受力方向掺 6%连续聚丙烯纤维
砖砌体	20(c)	10	低矮的墙壁,砖直接码放

注：c 表示抗压强度,t 表示抗拉强度。

0.4 建筑材料课程的特点与学习内容

人们对于建筑材料的认识来源于三方面：第一,通过对材料的试件进行力学实验,获得有关材料性质的数据,例如强度、弹性模量,为结构设计或结构分析提供依据；第二,材料加工、运输和现场施工的实践是非常重要的另一来源；第三,由于材料科学和检测技术的发展,对材料物理和化学结构进行深入研究得到的认识。三个来源：经验、实验技术和科学,目前依然没有在土木工程领域里很好地相互联系起来,这既有碍于对材料的认识,也不利于材料的应用。建筑材料课就在于把几方面的知识贯穿及统一起来,对它们的认识系统化,让使用建筑材料的工程技术人员具备一定的材料科学理论基础和材料的应用技术与经验。

建筑材料课程是一门技术基础课,教学目的主要有两方面：在学习土木建筑工程的基本理论和专业课程之间,架起一座有关材料科学知识的桥梁；为以后工作中选用建筑材料提供必要的基本知识。对于学完了大学物理、化学的学生来说,这门课的知识有一定连贯性,但由于一直是面对基础理论课程,这门课与工程实践联系紧密,学习时又有一定难度。

与基础理论课比较,建筑材料课程突出的特点是学习定性的,而不是定量的分析事物的能力；学习根据广泛的理论知识和实践知识综合解释问题的能力,而不是仅根据基础理论知识深入地分析问题的能力。因为它更接近工程实际,不像基础理论课程那样,对具体的现象和结构进行简化、抽象,反映出建筑材料的多样性、复杂性,使初学者感到它的不确定性、模糊性。一位同学在学习这门课程时谈到他的体会：学习建筑材料,有一个很深的印象,就是要懂得事物的模糊性,不确定的一面。以往的学习,我们总想得到一个确定的(精确的)解。但实际工程远不是这样,我们必须面对不确定性、模糊性问题。希望从上建材课开始培养这方面的能力——认识和解决不确定性的问题。

本课程只讲述建筑材料学科的基础知识,涉及主要的结构工程材料,着重让学生掌握运用基础理论知识去分析和认识这些材料的主要性能,以及结构、组成与性能之间的关系,并且能够“举一反三”,推及其他建筑材料。建筑材料的种类非常多,如根据功能划分,包括结构材料、围护材料、隔热材料、防水材料、吸声与隔声材料、装饰材料六大类。实际应用中,许多建筑材料具有两种或多种功能。

结合建筑材料课程上述特点,本课程在教学方法上,采取以下一些做法：

- (1) 注重与材料科学等基础理论相结合进行教学,加强与工程实践紧密结合。
- (2) 鼓励学生发挥主动性：多看参考书、多思考、多提问题和多进行讨论。
- (3) 根据教学要求,不断更新实验课内容,逐步开设供学生选修、选做的高水平实验,包括综合型、设计型或科研型实验,实验课上同学动手动脑的时间要尽量多。
- (4) 强调作业与实验报告要自己动手、动脑独立完成。

第 1 章

建筑材料科学基础

作为一名土木工程师,对于在建筑工程中所使用的材料,至少需要了解以下三个方面:

- (1) 材料在建筑工程中使用时呈现哪些性能?
- (2) 为什么材料具有这样的性能?
- (3) 材料的性能是否已经充分利用? 现有的材料能否改进?

为了回答上述问题,必须深入到材料结构内部,研究材料的微观结构与宏观性能间的关系。我们将要探讨组成物质的基本单元,把它们结合在一起的作用力,以及材料在外界作用下的反应,即材料的性能。由于本书主要讨论建筑结构材料,即用于制造承受建筑荷载的构件的材料,所以材料的性能主要涉及材料的力学性能、变形性能和耐久性能。而那些在建筑中使用的具有电、光、声、热和装饰功能和效果的材料为功能材料,不在本书中讨论。

1.1 物质的存在状态与结合力

世界上的一切物质都是由一百多种元素组成的。在物理学中把物质的聚集状态分为气、液、固三态。其中气、液两态又称为流态。建筑材料主要是固态物质,即使是液态的材料(如粘接剂、油漆、涂料等),也是在凝固以后才有实用价值。另有一大类物质是由气、液、固三种状态中的两种构成的高分散体系,称为胶体物质。

1.1.1 固体物质

按粒子排列的特点,固体可分为无定形体和晶体两大类。无定形体又称为非晶体,实际上是一种过冷液体,例如玻璃和塑料等。组成此类物质的粒子仅在局部有序排列,即短程有序,没有固定的熔点。大多数固体物质是晶体,组成它们的粒子(离子、原子或分子)在三维空间有规律地周期性重复排列,贯穿整个体积,形成空间格子构造,即长程有序。构成空间格子的粒子之间存在一定的结合作用力,以保证它们在晶体内固定在一定的位置上有序地排列。当离子或原子间通过化学结合力产生了结合时,称为形成了化学键。而分子间的结合一般形成分子间键或范德华键。

晶体中的原子能够规则排列,是原子间相互作用力平衡的结果。当两个原子接近并产生相互作用时,原子中的外层电子将重新排布。这种相互作用包括静电吸引与排斥作用。吸引力为异性电荷之间的库仑引力,是一种长程力,从比原子间距大得多的距离处即开始起作用。这种引力随原子间距的减小成指数关系增大(吸引力为负值),如

图 1-1(a)中 f_a 曲线所示;相应地吸引能量也随原子间距的减小而增大,如图 1-1(b)中 U_a 曲线所示。排斥力产生于同性电荷之间的库仑斥力和原子相互接近时电子云相互重叠所引起的斥力等,它们都是短程力,即只有原子之间的距离接近原子间距时才有显著作用。随着原子间距离进一步减小,斥力迅速增大(斥力为正值)。斥力增大的速度大于引力增大的速度,如图 1-1(a)中 f_r 曲线所示。原子间的排斥能量也随原子间距的减小而迅速增大,如图 1-1(b)中 U_r 曲线所示。原子间总的相互作用力 f_t 随距离的变化如图 1-1(a)中 f_t 曲线所示,原子间总的相互作用能 U_t 随距离的变化如图 1-1(b)中 U_t 曲线所示。

f_t 曲线交横轴于 A。A 点的合力为零,即原子间距离为 r_0 时吸引力和排斥力平衡,原子间相互作用的势能最低(见图 1-1(b))。距离小于 r_0 时斥力大于引力,总的作用力为斥力;距离大于 r_0 时引力大于斥力,总的作用力为引力。所以欲将相距为 r_0 的原子压近或拉远,都要相应地对斥力或引力做功,导致体系能量的升高。凝聚体只有当其原子间距离为平衡距离,作规则排列,形成晶体,对应于最低能量分布时,才处于稳定状态。图 1-1(b)中平衡位置 A 所对应的最低势能 U_0 为晶体原子的结合能,相当于把原子完全拆散所需要做的功。 U_0 是影响物质状态,决定晶体结构和性能的最本质因素。

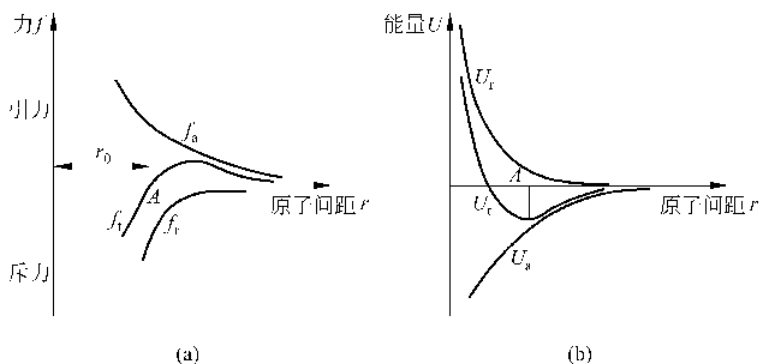


图 1-1 物质内部质点相互作用的力、能量与质点间距的关系

(a) 作用力 f 与原子间距 r 的关系; (b) 能量 U 与原子间距 r 的关系

从晶体结构中粒子结合能与间距,作用力与间距的关系,可以得到一些与实际应用有关的结论:

- (1) 当材料受拉伸或压缩时,力和材料长度变化成正比,这就是著名的胡克定律。 $F-r$ 曲线在 $r=r_0$ 时的斜率就是弹性模量(或者称刚度)。
- (2) $F-r$ 曲线在平衡位置两侧是对称的,所以材料的刚度在拉伸和压缩时应该是相同的,事实正是如此。
- (3) 原子间的引力存在最大值,因此拉伸强度有极限值。
- (4) 原子间的斥力可以无限增大,所以材料不会受压破坏,在压应力的作用下,破坏仍由拉力或剪力引起。
- (5) 如果原子在其平衡位置周围振动,其间隔会随振动加剧而增大,这可以从 $U-r$ 曲线波谷的不对称性看出。在绝对零度以上的任何温度,材料原子的振动都与温度成正比,因而材料受热时向各向膨胀。
- (6) 任何振动都能削弱原子间的结合强度,即温度升高时材料的拉伸强度降低。如果持续受热升温,原子的振动会达到使原子间的化学键断裂的程度,此时固体发生熔融。

1.1.2 胶体物质

除了典型的固、液、气三种物质状态之外,还有一些材料是由两种状态的物质组成的,例如胶体,常

见的如果冻、泥浆等。胶体是由具有物质三态(固、液、气)中某种状态的高分散度的粒子作为分散相,分散于另一相(分散介质)中所形成的系统。显然,高度分散性和多相性是胶体物质系统的特点,从而导致胶体具有聚结不稳定性 and 流变性等特性。胶体的表面能很大,因此在热力学上是不稳定的体系。

常见的由液固两相组成的胶体可分为溶胶和凝胶两种。溶胶是指平均尺寸约小于 100nm 的极细固体微粒分散于液体中的胶态悬浮体。如果溶胶中的胶态微粒连接在一起,形成固体网络,而液体包含在微粒之间的极细毛细管内,或包含在骨架中的极小空洞内,则得到凝胶。如果凝胶内微粒间的连接键很少或很弱,单个颗粒有很大自由度在其接触点附近运动,凝胶就很容易变形,表现出类似于液体的性质。如果微粒间的键合程度很高,尽管凝胶是多孔的,仍可形成十分坚硬而结实的结构,表现出类似于固体的性质。沥青是一种组分非常复杂的胶体材料,由于制备过程和存在条件的不同,沥青可以是溶胶,也可以是凝胶,其性能也相应变化。工程中用到的最重要的凝胶无疑是能形成坚固骨架的水泥凝胶。将水泥与水拌和,水泥颗粒发生水化反应,生成水化硅酸钙凝胶。这些凝胶相互连接,形成强度高、有渗透性的坚硬石状物。这是整个混凝土技术的基础。

如果一种凝胶中的微粒只以很弱的键力连接,就可以通过剧烈地搅拌使之破坏,使凝胶重新恢复成液态;而搅拌停止后,微粒重新键合,凝胶再次变稠,最后恢复到原始的凝聚状态,这种在外力增大时材料呈流动性的性质称为触变性。新拌混凝土在早期表现出明显的触变性,在用滑模摊铺机摊铺水泥混凝土路面时,就充分利用了新拌混凝土的触变性能。把新拌混凝土倒在摊铺机前面,摊铺机通过时,它前面的振动器插入混凝土,进行高频率的强力振动。在其作用下,混凝土产生液化,流动并填充摊铺机两边侧模之间的空间。然后利用机器的自重将混凝土压实。当摊铺机通过后,振动作用停止,重新变稠的混凝土虽然两侧已没有侧模的限制,但仍然不会坍塌或变形。经过一段时间后,混凝土才硬化并产生足够强度,成为固体物质。

粘土泥浆也可表现出触变性(与粘土的结构和含水量有关)。在石油钻井工程中,这种特性得到了应用。这种有触变性的粘土泥浆在井壁形成不透水层,中心部分则靠钻杆转动时力的作用保持流动性,作为载体将钻下来的岩屑携带出来。但是若在土木工程结构物基础下面遇到有触变性的粘土时,则可能产生很大的危害。例如英国的北海油田就曾发生过钻井平台因这种效应而移位失踪的事故(海洋里的粘土含水量非常高,而钻井平台有些是悬浮的,不与海底的岩石基础相连,在这种特殊条件下产生了上述现象)。

1.2 物体受力时的变形性能

物质的存在状态不同,其受力时的变形性能也不同。流体(气体和液体)在外力作用下将立即发生持续变形,即发生流动。固体则能抵抗外力的作用,保持自身的形状。定义物体在单位面积上所受的力为物体的应力 σ ,即

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

式中, F 为外力, A 为受力面积。当物体受剪切作用时,则受到剪切应力 τ ,应力的单位为 N/m^2 ,符号为 Pa。由于实际物体都不是理想刚体,在受力时物体内部各质点之间会发生相对位移。在单轴拉力或压力作用下,物体伸长或缩短。单位长度上的长度变化称为应变, $\epsilon = \Delta L/L$;在剪切应力作用下则发生剪切应变 γ ,定义为物体内部一体积元上的两个面元之间的夹角的变化。应变是一个比值,没有量纲。

如果应力与应变之间存在着一一对应的关系,在应力消除以后,形变亦随之消失(见图 1-2(b)),这种形变称为弹性形变。只发生弹性形变的物体称为弹性体,又称胡克固体。如果弹性体的应力和应变成正比关系,服从著名的胡克定律

$$\sigma = E\epsilon \quad (1.2)$$

式中,比例常数 E 称为杨氏弹性模量,具有应力的量纲,即 Pa,则这种物体称为线弹性体。线弹性体是材料力学和弹性理论的研究对象。对于许多常用材料(如建筑钢材)来说,在一定的范围内,应力与应变的关系基本满足胡克定律,可以按线弹性体对待。

如果线弹性体受到剪切作用,剪切应力 τ 与剪切应变 γ 的关系为

$$\tau = G\gamma \quad (1.3)$$

式中,比例常数 G 称为剪切模量,同样具有应力的量纲,即 Pa。

在各向相同的压力(等静压) P 作用下,固体的体积 V 发生变化为 ΔV ,且

$$P = -K \frac{\Delta V}{V} \quad (1.4)$$

式中, K 称为体积模量,负号表示压力增大时体积减小。

物体受力时,其组成粒子要偏离正常位置,因此,弹性体受拉应力时,在作用方向(轴向)引起伸长 ϵ_a 的同时,在与之垂直的方向上(侧向)引起收缩 ϵ_s ,即

$$\epsilon_s = -\nu\epsilon_a$$

式中, ν 称为泊松比。

固体材料的 G 、 E 、 K 和 ν 四个常数中,只有两个是独立的。对于各向同性材料,存在如下关系

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (1.5)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (1.6)$$

大多数晶体材料虽然微观上各晶粒具有方向性,但因晶粒数量很大,且随机排列,故宏观上可以作为各向同性材料处理。

由于组成流体的微粒可以自由运动,所以即使很小的外力也可以引起不可逆的流动。对于理想流体(牛顿流体),剪切应力 τ 与应变速率 $\frac{d\gamma}{dt}$ 成正比(牛顿定律)

$$\tau = \eta \frac{d\gamma}{dt} \quad (1.7)$$

式中,比例常数 η 称为粘性系数或粘度,是材料的性能参数。液体在剪切应力作用下,剪切应变将随时间不断增加,这种形变称为粘性流动。牛顿流体是流体力学研究的对象之一。

很明显,液体具有体积模量,但没有剪切模量,不能抵抗剪力,而固体则同时具有体积模量和剪切模量。能否具有剪切模量,从而抵抗剪力,是固体和液体的区别所在。因为

$$\frac{G}{K} = \frac{3(1-2\nu)}{2(1+\nu)}$$

为了在变形过程中使物体体积保持不变,应有 $\nu=0.5$,这种情况代表理想流体。只有软橡胶的泊松比为 0.49,非常接近理想流体。对于弹性变形,一般金属材料的泊松比为 0.29~0.33,而大多数无机材料的泊松比为 0.2~0.25。也就是说,拉应力作用方向上原子间距的增加会促使侧向收缩,但原子之间的排斥力又会限制这种收缩,使其达不到维持体积不变所必需的收缩量。

另外还有一类理想物体,当剪切应力小于某一极限值(屈服应力)时不发生剪切应变;当剪切应力达