

M 高等学校“十一五”规划教材
材料科学与工程系列

建筑结构材料

Structural Materials

迟培云 编著

交叉性 前沿性 融合相关学科 代表材料领域的发展方向
先进性 科学性 院士专家著书 反映材料科学的最新成果
可读性 广交性 内容丰富翔实 促进材料工程的应用实践

哈尔滨工业大学出版社

高等学校“十一五”规划教材
材料科学与工程系列

建筑结构材料

迟培云 编著

哈尔滨工业大学出版社

内容提要

本书共分为十一章,内容包括材料学基础,建筑金属材料,混凝土,混凝土工程,预应力混凝土工程,模板工程,沥青混合料,砌体材料,木材,复合材料概论,土,试验及习题。

本书适用于高等院校本科材料科学与工程专业,也可用于土木工程类及其他相关专业,并可供土木工程设计、施工、材料科学研究的专业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

建筑结构材料/迟培云编著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2007.8

ISBN 978-7-5603-2272-8

I.建… II.迟… III.建筑材料 IV.TU5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 086530 号

责任编辑 张秀华

封面设计 卞秉利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451 - 86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 黑龙江省地质测绘印制中心印刷厂

开 本 787mm × 1092mm 1/16 印张 19 字数 440 千字

版 次 2007 年 8 月第 1 版 2007 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-2272-8

印 数 1 ~ 4 000 册

定 价 26.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

建筑有“凝固的音乐”和“人类文明史册”之称,而建筑工程的总体效果、功能的实现都是通过材料体现出来的,材料的品种、质量及规格直接影响建筑工程的坚固、耐久和适用,并在一定程度上影响着建筑的结构形式和施工方法。所以,建筑及其材料反映了一个时代的文明、艺术和科学技术水平。

历史事实表明,建筑工程中许多技术问题的突破,往往依赖于建筑结构材料问题的解决,而新的建筑结构材料的出现又将促进建筑风格、结构设计及施工技术的革新。譬如粘土砖瓦的出现,建筑材料由天然材料变为可以人工生产,为大规模建筑房屋创造了物质条件,并创造出了砖石结构和拱形结构,为人类文明进步作出了重要贡献。同样,水泥的发明,造就了新的人造材料——混凝土,进而出现了钢筋混凝土和预应力混凝土。随着水泥与混凝土生产技术的迅速发展,混凝土的用量急剧增加,使用范围日益扩大,现已成为世界上用量最多的人造材料,并由此创造出了诸如砖混、框架、剪力墙、筒体、壳体以及高耸等结构形式。

高效能减水剂的发明与应用,促进了混凝土技术的重大发展。在混凝土中掺入高效能减水剂可以大幅度减少用水量、提高强度,或者急剧地增加混凝土拌合物的流动性,使混凝土混合料的拌制、运输、浇注和成型等工艺过程变得容易,甚至能做到泵送浇筑或免振自密实,使混凝土性能得到改善,施工效率显著提高。

优质钢材及高强度钢筋的出现,促进了网架结构、空间结构、预应力大跨结构、斜拉结构以及悬索结构等先进宏伟的结构形式的迅速发展,其艺术表现形式和艺术感染力也不断得到升华。

目前,建筑材料的发展已步入高分子材料时代,正酝酿着建筑技术的新的变革。

由于复合材料各组分之间“取长补短”、“协同作用”,极大地弥补了单一材料的缺点,产生单一材料所不具有的新性能,也是材料设计方面的一个突破,它综合了各种材料的优点,按需要进行设计复合成为综合性能优异的新型材料。可以预言,如果用材料作为历史分期的依据,那么 21 世纪将是复合材料的时代。

《建筑结构材料》是“材料科学与工程”专业之“无机非金属材料”方向的主要专业课程之一,旨在研究各种材料的组分、内部结构和性能之间的依存关

系,以及外界因素对其结构形成和性能的影响,以期逐步达到按指定性能设计和制造材料。

本课程主要培养学生牢固掌握各种材料的结构、性能、各种参数与结构和性能的关系的基本理论,以及主要材料的基本试验技术,使读者能根据实际工程中对各种材料的使用要求,正确地选用原材料,合理地设计,最后制成经济、适用、耐久的各种材料。同时,也注意引导学生运用已修课程及一些现代科学知识来解释和研究材料的结构和性能,为其今后从事建筑结构材料科学研究准备好必要的理论基础,以适应材料科学日益发展的需要。在编著本书过程中得到了青岛理工大学教务处及土木工程学院等部门领导和同事们的大力支持和无私帮助,同时也得到了材料科学与工程教研室的同事们的无私协助,在此一并表示衷心感谢。

由于本书涉及面广,作者水平有限,疏漏之处在所难免,恳请读者不吝赐教,本书所摘引的有关材料,在此向原作者谨表谢意。

作者

2007.5

目 录

第 1 章 材料学基础	1
1.1 概述	1
1.2 材料的结构层次	2
1.3 材料的变异性	4
1.4 材料存在的状态	5
1.5 材料的基本状态参数	7
1.6 材料的力学性质	9
1.7 材料与水有关的性质	13
1.8 材料的热性质	15
1.9 材料的耐久性	17
第 2 章 建筑金属材料	18
2.1 钢材的分类	18
2.2 建筑钢材的主要技术性能	19
2.3 钢材的组成结构及其性能的影响	23
2.4 钢材的强化与加工	25
2.5 土木工程常用金属材料的性质与应用	27
2.6 钢材的腐蚀与防护	36
2.7 钢筋连接	38
2.8 机械连接	42
2.9 钢筋的配料与代换	43
第 3 章 混凝土	45
3.1 普通混凝土的组成	46
3.2 普通混凝土的主要技术性质	77
3.3 普通混凝土的配合比设计及质量控制	93
3.4 其他种类混凝土及其新进展	99
第 4 章 混凝土工程	113
4.1 混凝土的制备	113
4.2 混凝土的运输	118
4.3 混凝土的成型	123
4.4 混凝土的养护	132
4.5 混凝土质量检查	134
4.6 混凝土制品的生产	136

第 5 章 预应力混凝土工程	138
5.1 概述	138
5.2 现代预应力结构最新进展	139
5.3 预应力混凝土的基本原理及分类	142
5.4 有效预应力的计算及减小预应力损失的措施	143
5.5 预应力混凝土的施工方法	145
5.6 无粘结预应力混凝土施工工艺	157
第 6 章 模板工程	158
6.1 模板构造	158
6.2 模板设计	160
6.3 组合钢模板	162
第 7 章 沥青混合料	164
7.1 沥青材料	164
7.2 沥青混合料	173
第 8 章 砌体材料	188
8.1 砌筑砂浆	188
8.2 砖	192
8.3 砌块及墙体材料的发展	196
8.4 砌筑石材	199
8.5 砌体工程	201
第 9 章 木材	207
9.1 木材的分类与构造	207
9.2 木材的性能及应用	208
9.3 木材的防护与防火	211
第 10 章 复合材料概论	213
10.1 复合材料的发展概况	213
10.2 复合材料的命名和分类	214
10.3 复合材料的基本性能	215
10.4 复合材料的增强机理	219
10.5 复合材料结构设计基础	220
10.6 常用复合材料	223
第 11 章 土	229
11.1 土的三相组成	230
11.2 土的基本物理性质	231
11.3 土的工程分类	236
11.4 土的基本力学性质	239
11.5 土体处理工程	243

试验部分	248
试验一 材料学基础基本物理性质试验	248
试验二 金属材料试验	250
试验三 水泥技术性能试验	253
试验四 建筑用砂石试验	260
试验五 普通混凝土试验	267
试验六 加气混凝土力学性能试验	271
试验七 石油沥青试验	273
试验八 沥青混合料试验	277
习题部分	285
参考文献	294

第1章 材料学基础

1.1 概 述

1.1.1 土木工程材料的分类(Classification of civil engineering materials)

组成建筑结构物的最基本构成元素是材料,能用于土木工程的材料品种繁多,性质各异,用途不同。最基本的分类方法是根据组成物质的化学成分,将土木工程材料分为无机材料、有机材料和复合材料三大类,各大类又可细分为许多小类,具体分类如表 1.1 所示。

表 1.1 土木工程材料按化学组成分类

无机材料	金属材料	黑色金属:铁、碳素钢、合金钢、不锈钢等 有色金属:铝、镁、铜等及其合金等
	非金属材料	天然石材:砂、碎石及石材制品等 烧土制品:砖、瓦、陶瓷、玻璃等 胶凝材料:石灰、石膏、苦土、水玻璃、水泥等 混凝土、砂浆及硅酸盐制品
有机材料	植物质材料	木材、竹材、植物纤维及其制品
	动物质材料	皮、毛等及其制品
	高分子材料	塑料、橡胶、涂料、胶粘剂、合成纤维及其制品
	沥青材料	石油沥青、煤沥青等及其制品、沥青混合料
复合材料	金属-非金属材料	钢纤维混凝土、钢筋混凝土、金属陶瓷等
	无机非金属-有机材料	玻璃钢、聚合物混凝土、沥青混凝土等

按使用功能通常可分为承重结构材料、非承重结构材料和功能材料三大类。

(1) 承重结构材料:主要指梁、板、基础、墙体和其他受力构件所用的材料,最常用的有钢材、木材、混凝土、砖、砌块、料石等。

(2) 非承重结构材料:主要包括框架结构的填充墙、内隔墙和其他围护材料等。

(3) 功能材料:主要有防水材料、防火材料、装饰材料、绝热材料、吸音隔声材料等。

1.1.2 土木工程材料与工程结构的关系(Relation between civil engineering materials and engineering structure)

土木工程材料的更新是新型结构出现与发展的基础。在古代,土木工程材料主要是木材、石材等,限制了建筑物的规模,公元 125 年,古罗马时期以火山灰和石灰作为胶凝材料配制了早期的混凝土,用 12 000 t 这种混凝土建造了穹形屋顶、直径 44 m、外观非常宏伟的万神庙,成为人类建筑史上的一座丰碑。到了 19 世纪,随着硅酸盐水泥的发明,出现

了钢筋混凝土,1912年在波兰布雷劳斯市建造的肋形拱顶、直径65 m的世纪大厅,耗用了钢筋混凝土1 500 t。随着建筑技术的发展,出现了钢筋混凝土薄壁构件,墨西哥的洛杉矶南什斯饭店采用双曲抛物面薄壳屋盖,直径32 m,厚度4 cm,质量只有100 t。随着材料科学技术的发展,1997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 cm,质量只有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,质量进一步减轻,而用厚度仅为0.2 mm的建筑膜搭建起的新型膜结构,每平方米质量仅20 kg。由此可见,土木工程材料的品种、质量及规格直接影响工程结构的坚固、耐久和适用,并在一定程度上影响着结构形式和施工方法。而且,工程结构中许多技术问题的突破,往往依赖于土木工程材料问题的解决,而新的土木工程材料的出现又将促使建筑风格、结构设计及施工技术革新,所以,新的轻质高强材料的不断涌现,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。

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

首先,材料必须具有足够的强度,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,从而使整体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,具有重大技术和经济意义。

不同的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,导致混凝土变形的主要因素则是凝胶体或水分的迁移。变形性能不仅影响材料承载能力,而且因为变形受约束导致开裂,对材料的耐久性能也带来明显的影响。

耐久性是指土木工程材料应用于结构物时,维持正常使用性能的能力。由于恶劣环境里各种基础设施建设的发展,例如,在沙漠、海洋中开采石油的相关设施,海洋与近海结构物等的建设和使用,对于材料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的使用寿命并尽量减少维修费用,从而降低年均投资。

1.2 材料的结构层次

我们需要从不同尺度的结构层次去分析材料,由小到大可分为分子尺度、材料结构尺度和工程尺度。

1.2.1 分子尺度(Molecular scale)

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

材料的化学成分也决定着材料的物理结构。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。还有些材料,例如金属由于周围环境影响,氧和酸等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决定,砖、混凝土等多孔材料许多重要的性质,如强度、刚度都与其孔隙率成反比,其渗透性和孔隙率也有直接联系。

在这个尺度上,测定材料结构的试验技术已经相当先进,使用电子显微镜、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。

1.2.2 材料结构尺度(Material structural scale)

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 5×10^{-5} mm 的木材细胞壁,到长达 240 mm 的一块砖。

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,就可预测常规试验范围以外的多相材料特性,因此模型的提出要注意以下几点。

(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相的弹性模量,材料随时间发生的变形取决于各相的粘度。

(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,因此有可能会呈现出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。

研究材料结构尺度时,对以上三方面要充分地了解,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。

1.2.3 工程尺度(Engineering scale)

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连续的,通过研究获得材料整体的平均特性。人们对各种土木工程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,其最小尺度要由能代表其特性,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 100 mm,乃至砌体结构的 1 000 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工程结构同等环境条件下进行试验得到的结果,进行多种方式试验,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。在试验范围内的推测,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。

1.3 材料的变异性

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性质,而材料的均匀程度又取决于材料制造加工过程的工艺。钢材的生产已很完善,能较精确控制其过程,因此工程上所需的各种钢材可以迅速地、复演良好地再生产,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,例如结疤,其性能的波动就很大。

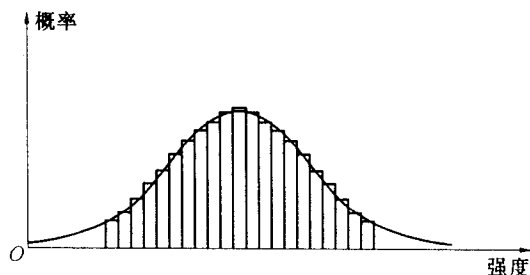


图 1.1 材料强度正态分布曲线

材料很多特性的变异符合图 1.1 所示的正态分布曲线。如果对大量相同的试件进行试验,例如强度,结果可以画成直方图,见图 1.1。如果 x 为强度 $f_{cu,i}$,这样强度就可以用两个数值表示。

(1) 平均强度 $\bar{f}$,对 n 个试件有

$$\bar{f} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{cu,i}$$

(2) 变化范围用标准差 σ 表示

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_{cu,i} - \bar{f})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n f_{cu,i}^2 - n\bar{f}^2}{n-1}}$$

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

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{f}}$$

对于可比性能,原木的变异必定要比钢材高得多,因此它的变异系数就大。表 1.2 是通过同批材料的大量样品进行试验,列出一些典型材料的平均强度和变异系数。

土木工程材料在工厂生产与加工过程中,自然是考虑其各种性能的因素。但是另一方面,其使用过程也是影响性能的重要环节,例如搅拌好的混凝土运到现场,还只是一种中间产品,把其浇入模板里以后,要进行振捣,待混凝土开始硬化后要及时洒水或喷雾足

够长时间养护,才能保证结构物具备设计要求的承载力和其他性能。再如钢筋,虽然在工厂里已加工成型,但施工现场要进行焊接,焊点的质量对于其承载力非常关键。所以从某种意义上可以说,施工现场的工程师或施工者,不仅是土木工程材料的用户,也是最终产品的生产者,在相当大的程度上决定最终产品的质量。

表 1.2 一些土木工程材料的强度变异性

材 料	平均强度/MPa	变异系数/%	备注
钢 材	460	2	结构低碳钢
混凝土	40	15	普通混凝土
木 材	30	35	针叶木原材
	120	18	无结疤、直纹针叶木
	11	10	结构用木屑板
纤维水泥复合材料	18	10	掺 6% 聚丙烯纤维
砖砌体	20	10	矮小砖墙

1.4 材料存在的状态

世界上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。土木工程材料主要是固态物质,即使液态的材料(如粘结剂、油漆、涂料等),也是在凝固以后才有实用价值。另一大类物质是由气、液、固三种状态中的两种构成的高分散体系,称为胶体物质。

1.4.1 固体物质(Solid substance)

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,没有固定熔点。大多数固体物质是晶体,组成晶体的粒子(离子、原子或分子)在三维空间作有规律的周期性排列,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力,以保证它们在晶体内固定在一定的位置上作有序的排列,当粒子或原子间通过化学结合力产生了结合,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,是原子间的相互作用平衡的结果。当两个原子接近并产生相互作用,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 1.2(a)曲线中 f_a 所示。排斥力产生于同性电荷之间的库仑斥力和原子之间相互接近的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),增大速度大于引力增大速度,如图 1.2(a)中 f_r 曲线所示。原子间总的相互作用力随距离的变化如图 1.2(a) f_t 曲线所示。

f_i 曲线交横轴于 A , A 点的合力为零, 即原子间距 r 为 r_0 时吸引力与排斥力平衡, 原子间相互作用的势能最低, 见图 1.2(b)。原子间距 r 小于 r_0 时, 斥力大于引力, 总的作用力为斥力, 原子间距 r 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 的原子压近或者拉远, 都要相应地对斥力或引力做功, 导致体系能量升高。凝聚体只有当其原子间距为平衡距离, 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 1.2(b) 中平衡的位置 A 所对应的最低热能 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。

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, 这是著名的虎克定律。 $F - r$ 曲线在 $r = r_0$ 时的斜率就是弹性模量(或者称刚度)。

(2) 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, 因而材料受热时会膨胀。

(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。

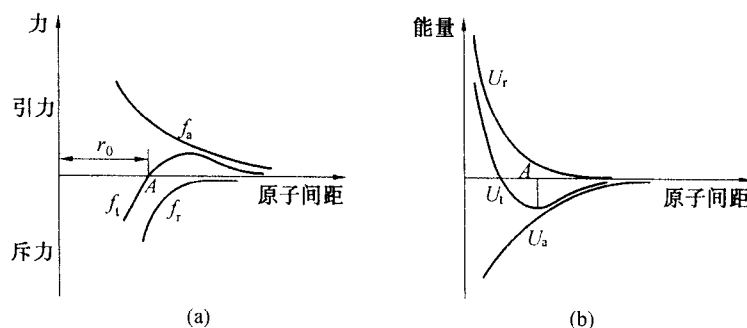


图 1.2 物质内部质点相互作用的力、能量与质点间距的关系

1.4.2 胶体物质(Colloid substance)

除了典型的固、液、气三种物质状态之外, 还有一些材料中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及流变性等特性。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。溶胶是指平均尺寸小于

100 nm 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。

如果一种凝胶只以很弱的键力连接,便可以通过剧烈的搅拌使之破坏,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,在滑模摊铺机通过时,摊铺机前面的振动器插入混凝土,进行高频率地强力振动,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,经过一段时间后,混凝土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(海洋的粘土天然含水量非常高,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)。

1.5 材料的基本状态参数

1.5.1 材料的密度、表观密度和堆积密度

1. 密度(Density)

材料在绝对密实状态下单位体积的质量称为密度,其公式为

$$\rho = \frac{m}{V}$$

式中, ρ 为材料的密度(g/cm^3); m 为材料在干燥状态下的质量(g); V 为材料在绝对密实状态下的体积(cm^3)。

所谓绝对密实状态下的体积,是指不包括材料内部孔隙的固体物质的实体积。

常用的土木工程材料中,除钢、玻璃、沥青等可认为不含孔隙外,绝大多数均或多或少含有孔隙。测定含孔材料绝对密实体积的简单方法,是将该材料磨成细粉,干燥后用排液法测得的粉末体积即为绝对密实体积。由于磨得越细,内部孔隙消除得越完全,测得的体积也越精确,因此,一般要求细粉的粒径至少小于 0.20 mm。

2. 表观密度(Apparent density)

材料在自然状态下单位体积的质量称为表观密度,其公式为

$$\rho_0 = \frac{m}{V_0}$$

式中, ρ_0 为材料的表观密度(kg/m^3); m 为材料的质量(kg); V_0 为材料在自然状态下的体积(m^3)。

所谓自然状态下的体积,是指包括材料实体和内部孔隙的外观几何形态的体积。

测定材料自然状态体积的方法较简单,若材料外观形状规则可直接度量其外形尺寸,按几何公式计算。若外观形态不规则可用排液法求得,为了防止液体由孔隙渗入材料内部而影响测值,应在材料表面涂蜡。

另外,材料的表观密度与含水量有关。材料含水时,质量要增加,体积也会发生不同程度的变化。因此,一般测定表观密度时,以干燥状态为准,而对含水状态下测定的表观密度,须注明含水情况。

3. 堆积密度(Bulk density)

散粒材料在自然堆积状态下单位体积的质量称为堆积密度,其公式为

$$\rho'_0 = \frac{m}{V'_0}$$

式中, ρ'_0 为散粒材料的堆积密度(kg/m^3); m 为散粒材料的质量(kg); V'_0 为散粒材料的自然堆积体积(m^3)。

散粒材料堆积状态下的外观体积,既包含了颗粒在自然状态下的体积,又包含了颗粒之间的空隙体积。散粒材料的堆积体积,常用其所填满的容器的体积来表示。散粒材料的堆积方式或是松散的,为自然堆积;也可是捣实的,为紧密堆积。由紧密堆积测试得到的是紧密堆积密度。

1.5.2 材料的孔隙和空隙

1. 材料的孔隙(Pore of material)

大多数土木工程材料的内部都含有孔隙,这些孔隙会对材料的性能产生不同程度的影响,一般认为孔隙可从两个方面对材料产生影响,一是孔隙的多少,二是孔隙的特征。

材料中含有孔隙的多少常用孔隙率表征,孔隙率是指材料内部孔隙体积(V_p)占材料总体积(V_0)的百分率。因为 $V_p = V_0 - V$,所以孔隙率可用下式表示

$$P = \frac{V_0 - V}{V_0} \times 100\% = \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right) \times 100\%$$

与孔隙率相对应的是材料的密实度,即材料内部固体物质的实体积占材料总体积的百分率,可用下式表示

$$D = \frac{V}{V_0} \times 100\% = \frac{\rho_0}{\rho} \times 100\% = 1 - P$$

材料的孔隙特征包括许多内容,以下仅介绍以后章节经常涉及的两个特征。

- (1) 按孔隙尺寸大小,可把孔隙分为微孔、细孔和大孔三种。
- (2) 按孔隙之间是否相互贯通,把孔隙分为互相隔开的孤立孔,或互相贯通的连通孔。
- (3) 按孔隙与外界之间是否连通,把孔隙分为与外界相连通的开口孔,或不相连通的

封闭孔。若把开口孔的孔体积记为 V_k , 闭口孔的孔体积记为 V_B , 则有 $V_p = V_k + V_B$ 。另外, 定义开口孔孔隙率为 $P_k = V_k/V_0$, 闭口孔孔隙率为 $P_B = V_B/V_0$, 则孔隙率 $P = P_k + P_B$ 。

开口孔隙率增加, 材料吸水量增大, 则材料易受冻破坏。

2. 空隙(Void)

散粒材料颗粒间的空隙多少常用空隙率表示, 空隙率定义为: 散粒材料颗粒间的空隙体积(V_s) 占堆积体积的百分率, 因为 $V_s = V'_0 - V_0$, 所以空隙率可按下式计算

$$P' = \frac{V'_0 - V_0}{V'_0} \times 100\% = \left(1 - \frac{\rho'_0}{\rho_0}\right) \times 100\%$$

与空隙率(Void Ratio) 相对应的是填充率, 即颗粒的自然状态体积占堆积体积的百分率, 可按下式计算

$$D' = \frac{V_0}{V'_0} \times 100\% = \frac{\rho'_0}{\rho_0} \times 100\% = 1 - P'$$

1.6 材料的力学性质

1.6.1 材料的理论强度(Theoretical strength of material)

固体材料的强度多取决于结构质点(原子、离子、分子) 之间的相互作用力。以共价键或离子键结合的晶体, 其结合力比较强, 材料的弹性模量值也较高。而以分子键结合的晶体, 其结合力较弱, 弹性模量值也较低。

材料受外力(荷载) 作用而产生破坏的原因, 主要是由于拉力造成结合键的断裂, 或是由于剪力造成质点间的滑移而破坏。材料受压力破坏, 实际上也是由压力引起内部产生拉应力或剪力而造成了破坏。

材料的理论抗拉强度, 可用下式表示

$$f_t = \sqrt{\frac{E\gamma}{d}}$$

式中, f_t 为理论抗拉强度; E 为纵向弹性模量; γ 为单位表面能; d 为原子间的距离。

材料的理论强度远远大于材料的实际强度, 这是由于材料实际结构中都有着许多缺陷, 如晶格的位错、杂质、孔隙、微裂缝等。当材料受外力作用时, 在裂缝端部产生应力集中, 其局部应力将大大超过平均应力, 引起了裂缝不断扩展、延伸以至互相连通起来, 最后导致材料的破坏。

以材料的断裂过程为例, 早在 1921 年, 格列菲斯(Griffith) 根据裂缝假说, 提出了关于理想脆性材料的格列菲斯断裂理论, 把材料的强度与表面能、裂缝尺寸联系起来。他假定材料中有长度为 $2C$ 的椭圆形裂缝, 当材料受拉时, 裂缝扩展, 材料弹性能释放为

$$\epsilon_e = \frac{\pi\sigma^2 C^2}{E}$$

式中, E 为弹性模量; σ 为抗拉强度。

同时, 裂缝扩展产生了新表面, 所需表面能为 $4C\gamma$, γ 为材料的表面自由能, 所以总能量为