

清华大学建筑材料系列教材

结构工程材料

章维祖 主编

Tsinghua University Press

清华大学出版社

Springer-Verlag

施普林格出版社

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

本教材讲述建筑材料科学基础和几种主要建筑材料的结构—性能—组成—生产加工及其相互之间的关系。编写中,力求反映近些年来国际建筑材料科学技术领域重要的进展,及其与结构设计、施工工艺、建筑机械的进展紧密联系,在基础设施工程建设和可持续发展战略中的重要作用。

本教材可以作为大学本科结构工程、工程管理、水工结构、工业与民用建筑、地下建筑工程、建筑学、环境工程等专业,以及建筑工程类其他专业的专业基础课教科书,也可作为建筑工程类有关设计、科研及施工人员的参考书。

书 名: 结构工程材料

作 者: 覃维祖 主编

出版者: 清华大学出版社(北京清华大学学研大厦,邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

印刷者: 北京市大中印刷厂

发行者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 787×1092 1/16 印张: 11.5 字数: 262 千字

版 次: 2000 年 9 月第 1 版 2000 年 9 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-04035-4/TB·27

印 数: 0001~3000

定 价: 19.00 元

前 言

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。熟悉建筑材料的基本知识、掌握各种新材料的特性，是进行结构设计与研究和工程管理必要的基本条件。反之，轻则影响结构物的外观和使用功能，重则危害结构的安全性，造成重大事故。

本课程是一门技术基础课，教学目的有两方面：为学习土木建筑工程的基本理论和专业课程之间，架起一座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。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、吸音与隔声材料、装饰材料六大类。

本教材可以作为大学本科结构工程、工程管理、水工结构、工业与民用建筑、地下建筑工程、建筑学、环境工程等专业，或土木建筑类其他专业的学生学习建筑材料专业基础课程的教科书；也可作为土木建筑类有关设计、科研及施工人员的参考书。

本教材由清华大学土木工程系建筑材料教研组几位教师集体编写。主编覃维祖。各章编写人：覃维祖撰写绪论、第3章，闫培渝撰写第1章、第2章，杨静撰写第4章，丁建彤撰写第5章。

编者

1999年11月

目 录

绪 论	1
第 1 章 建筑材料科学基础	8
1.1 物质的存在状态与结合力	8
1.1.1 固体物质	8
1.1.2 胶体物质	9
1.2 物体受力时的变形性能	10
1.2.1 弹性恢复能——储存能	13
1.2.2 粘弹性	13
1.2.3 塑性	14
1.3 固体界面行为	15
1.3.1 表面能与表面张力	15
1.3.2 吸附、润湿与粘附	16
1.4 材料的断裂与强度	18
1.4.1 材料的实际强度与理论强度	18
1.4.2 Griffith 微裂纹理论	19
第 2 章 金属材料	22
2.1 金属的结构	22
2.2 金属的技术性质	24
2.2.1 抗拉性能	24
2.2.2 冲击韧性	26
2.2.3 耐疲劳性	27
2.2.4 钢材的工艺性能	28
2.3 金属的强化	29
2.3.1 金属冷加工强化	29
2.3.2 其他强化方法	30
2.4 金属的腐蚀与防护	31
2.4.1 金属的腐蚀	31
2.4.2 电化学腐蚀的预防	32
2.5 金属在土木工程中的应用	33
2.5.1 钢铁	33
2.5.2 铝和铝合金材料	36

第 3 章 混凝土	37
3.1 概述	37
3.2 混凝土的结构	38
3.2.1 骨料	39
3.2.2 硬化水泥浆体	39
3.2.3 过渡区	42
3.3 混凝土的强度与破坏	43
3.3.1 强度—孔隙率关系	43
3.3.2 混凝土的破坏模式	43
3.3.3 抗压强度及其影响因素	44
3.3.4 混凝土在不同应力状态下的力学行为	47
3.4 混凝土的体积稳定性	51
3.4.1 变形的意义和类型	51
3.4.2 弹性行为	52
3.4.3 温度收缩与热膨胀	54
3.4.4 干燥收缩与徐变	55
3.4.5 自身收缩	60
3.4.6 碳化收缩	61
3.4.7 延伸性与开裂	61
3.5 混凝土耐久性	62
3.5.1 水与混凝土的劣化	63
3.5.2 混凝土的劣化	66
3.5.3 混凝土中钢材的锈蚀	71
3.5.4 混凝土耐久性设计	74
3.6 混凝土组成材料	76
3.6.1 水泥	76
3.6.2 骨料	81
3.6.3 外加剂	84
3.6.4 矿物掺合料	88
3.7 混凝土拌合物的配合比设计	92
3.7.1 配合比设计的目的	92
3.7.2 配合比设计的基本内容	93
3.7.3 配合比设计步骤	93
3.8 新拌及早期混凝土的性能	96
3.8.1 新拌混凝土的性能	96
3.8.2 拌合物浇筑后的性能	100
3.8.3 强度增长与温度的影响	101

第 4 章 沥青混凝土	106
4.1 沥青混凝土的结构与性能	106
4.1.1 沥青混凝土的定义与分类.....	106
4.1.2 沥青混凝土的组成与结构.....	107
4.1.3 沥青混凝土的强度理论及受力变形特征.....	109
4.1.4 沥青混凝土的技术性质.....	111
4.2 沥青混凝土的组成材料与配比设计	114
4.2.1 石油沥青及其性质.....	114
4.2.2 矿质材料.....	118
4.2.3 沥青混凝土配比设计.....	119
4.3 沥青混凝土的应用	121
4.3.1 道路工程中的应用.....	121
4.3.2 水工工程中的应用.....	125
第 5 章 砌体材料	128
5.1 概述	128
5.1.1 砖.....	128
5.1.2 砌块.....	130
5.1.3 石材.....	130
5.1.4 砌筑砂浆.....	131
5.1.5 灌注混凝土或稀砂浆.....	131
5.2 砌体与砌体材料的结构	132
5.2.1 砌体的整体结构.....	132
5.2.2 砖的孔结构.....	134
5.3 砌体及砌体材料的力学性能	135
5.3.1 砌体轴心受压应力状态.....	135
5.3.2 砌体轴心受拉应力状态.....	136
5.3.3 砌体弯曲受拉应力状态.....	137
5.3.4 块体和砂浆强度对砌体强度的影响.....	137
5.3.5 砌体材料对砌体弹性模量的影响.....	138
5.4 砌体材料的耐久性	138
5.4.1 体积变化.....	138
5.4.2 冻害.....	139
5.4.3 化学侵蚀.....	139
5.4.4 粉化和可溶性盐含量.....	140
5.5 砌体材料的其他物理性能	140
5.5.1 热工性能.....	140
5.5.2 耐火性.....	140

参考文献	142
附录 试验部分	143
试验 1 建筑材料基本性质试验	144
试验 2 水泥与外加剂试验	149
试验 3 胶凝材料与高效减水剂的相容性试验	155
试验 4 混凝土用砂、石试验	157
试验 5 混凝土配合比试验	163
试验 6 水泥、混凝土性能的电学测量试验	168
试验 7 石油沥青试验	170

绪 论

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,均直接或间接地与建筑材料密切相关。早在远古,人类就直接利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,则成为古代与现代人类建造各种类型建筑物的基础。

我国古代劳动人民巧妙地利用天然的建筑材料,建造出当时最高水平并且流传至今的建筑结构。其中最为雄伟和壮观的建筑工程当属万里长城。据史料记载,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5 000 km,总长度大约有 50 000 km 以上,所用的砖石土方量巨大。如果修一道宽 1m、高 5m 的大墙,大墙长度可绕地球十几周。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,还使用了大量的砖和石灰。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伟大成就,表现出我国古代劳动人民的聪明才智。

河北赵州石桥建于 1 300 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。建造该桥的石材为石灰岩,石质的抗压强度非常高(约 100MPa)。它虽然比意大利人建造的人类历史上最早的石拱桥(在公元 138 年建造的三孔跨度为 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,即公元 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。这也正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 16cm~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,直到现代才被国内外结构设计人员广泛认识。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,西方工业国家发明出种种现代建筑材料,从钢材、混凝土、钢筋混凝土与预应力混凝土,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、建筑膜等等。新的建筑材料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、通讯等的迅速发展奠定了基础,从而也为人类社会自 20 世纪,尤其是第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 亿吨、水泥 11.5 亿吨,混凝土使用量约 70 亿吨。

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 1t 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 178kg,同时放出约 1t 二氧化碳气体;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 1.2~1.3t。

然而,建筑材料的生产同时又是可以利用和消纳许多工业、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 亿吨)、高炉炼铁排放的矿渣(目前我国年排量约 0.45 亿吨)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,而且涉及从生产到使用的全过程,以及材料的再循环使用问题等等。

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,建筑材料主要是木材、石材等,限制了建筑物的跨径。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、直径为 44m,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、直径为 65m 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,钢筋混凝土薄壁构件出现,墨西哥洛斯马南什斯饭店采用双曲抛物面薄壳屋盖,直径 32m,厚度 4cm,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1cm、直径31cm,重量只有25t;近些年出现采用厚为1mm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0.2mm的建筑膜搭建起新型的膜结构,每平方米重量仅20kg。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. 结构与材料试验

结构与材料试验在传统上两者是互相分离的。结构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;而材料试验则似乎只是反复地加工大量试件,再用试验机把它们破坏。两者之间的关系好像仅仅是后者为前者提供必要的数据而已。因此,不少人认为:只要有各种规范、手册在手,结构工程师就能出色地进行设计工作。

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,都是已经在工程中获得广泛应用,积累了丰富的实践经验的材料;至于新材料,在工程中尚未广泛应用的,是没有现成数据可以参考的。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:建筑材料运抵工程现场,经过施工——再加工过程,例如混凝土的浇注、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,施工对结构工程的质量影响重大,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。

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:结构——性能——组成——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主要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。由于在恶劣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,由小到大可分为分子尺度、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1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,测定材料结构的试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为不同相的组合,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 240mm。

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,就可以预测常规试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强弱。

从材料结构尺度进行研究,对以上三方面要有充分地了解,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。

(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 000mm 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试验得到的结果。试验有多种方式,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。在试验范围内推测,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材料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、复演性良好地再生产,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 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试验,例如强度,结果可以画成直方图。直方图可用亚铃形曲线方程表示:

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

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

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

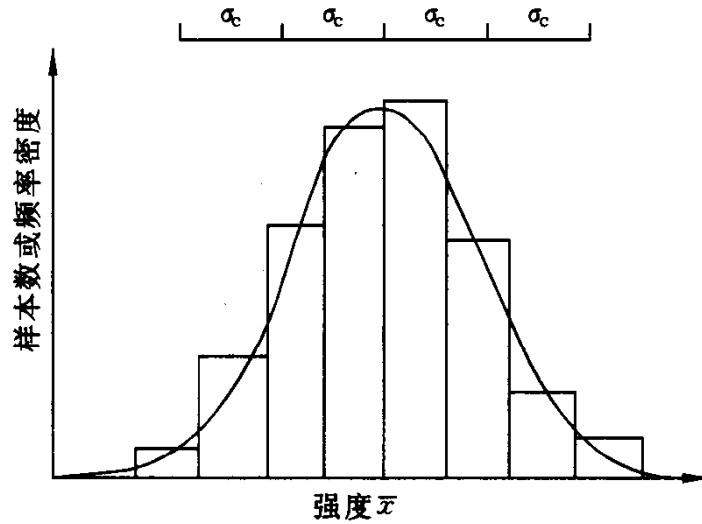


图 1 材料强度正态分布曲线

(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。下表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。

表 1 一些建筑材料的强度及其变异系数的比较(c = 抗压强度, t = 抗拉强度)

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 28d 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	矮小的墙壁，砖直接码放

建筑材料在工厂的生产与加工过程，自然是决定其各种性能的因素，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，把它浇入模板里以后，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整个施工队，他们不仅是建筑材料的用户，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。

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:首先,通过对材料的试件进行力学试验,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;其次,材料加工、运输和现场施工的实践是非常重要的另一来源;再次,由于材料科学和检测技术的发展,对材料的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。建筑材料课程就在于把几方面的知识贯穿、统一起来,使人们对它们的认识系统化,让相关的工程技术人员具备一定的材料科学理论基础,以及它的应用技术与经验。

建筑材料课程是一门技术基础课,教学目的主要有两方面:为学习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。希望从这门课开始培养认识和解决不确定性的问题的能力。

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、吸音与隔声材料、装饰材料六大类。

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 加强材料科学等基础理论内容的教学,加强与工程实践的紧密结合。
- ② 鼓励同学发挥主动性,多看参考书、多思考、多提问题和多进行讨论。
- ③ 根据教学要求内容不断更新实验课,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 强调学生通过自己动手、动脑独立完成作业与实验报告。

第 1 章 建筑材料科学基础

作为一个土木工程师,对于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,不在结构工程材料课程中讨论。

1.1 物质的存在状态与结合力

世界上的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作有序的排列。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,是原子间的相互作用平衡的结果。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;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),增大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。

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 时吸引力和排斥力平衡, 原子间相互作用的势能最低, 见图 1.1(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 1.1(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。

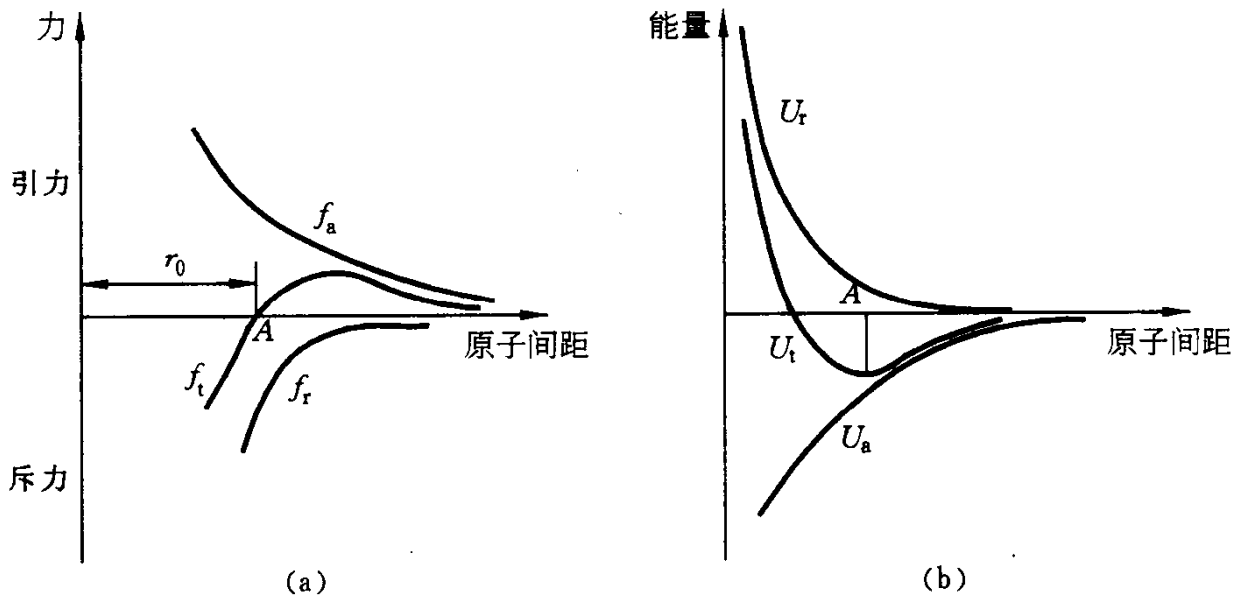


图 1.1 物质内部质点相互作用的力、能量与质点间距的关系
(a) 作用力(f)与原子间距(r)的关系 (b) 能量(U)与原子间距(r)的关系

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

② $F \sim r$ 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 $U \sim r$ 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,是整个混凝土技术的基础。

如果一种凝胶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,摊铺机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(海洋里的粘土天然含水量当然非常高,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内力为物体的应力 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