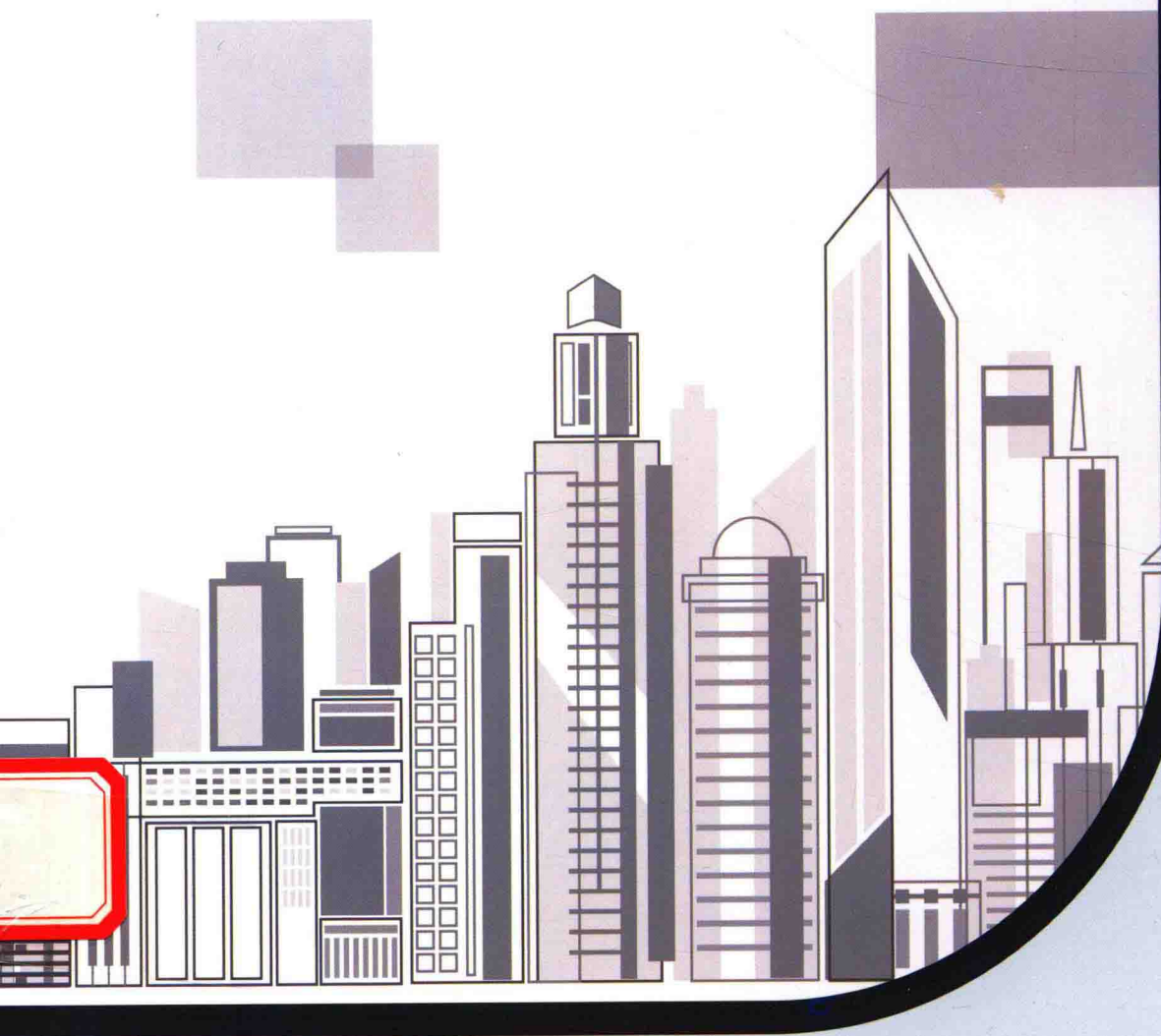


建筑材料

王立久 编 著



科学出版社

建 筑 材 料

王立久 编著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书是在作者多年教学经验的基础上编写的。作者首次以新的视角和理念完成此书，以适应当代大学生学以致用的需要。

本书共分为 5 章，分别是建筑材料的基本特征、矿物建筑材料、水泥、混凝土和建筑功能材料，而传统建筑材料教材所讲述的七大类材料，都已有机融合其中，并适当扩展。

本书强调教材的系统性、逻辑性和全面性，还特别注重培养学生的自学能力，启发其创新。

本书可作为本科院校土木工程类各专业学生用书，也可作为土木工程类科研院所、工程设计及行政管理人员参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑材料/王立久编著. —北京: 科学出版社, 2017

ISBN 978-7-03-051525-4

I. ①建… II. ①王… III. ①建筑材料-高等学校-教材 IV. ①TU5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 008292 号

责任编辑: 任加林 陈将浪 / 责任校对: 陶丽荣

责任印制: 吕春珉 / 封面设计: 东方人华平面设计部

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 1 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017 年 1 月第一次印刷 印张: 13 3/4

字数: 330 000

定价: 35.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈新科〉)

销售部电话 010-62136230 编辑部电话 010-62137026 (HA18)

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

建筑材料是指用于人居环境构筑物所用材料的总称。换句话说,人居环境的所有构筑物都是由建筑材料构成的。人居环境泛指“人类聚居环境”,它是“人类生存、从事生产、进行各种社会活动所在的环境”,而构筑物与建筑材料涉及内容十分广泛。

第一,建筑物或构筑物是人们用建筑材料构筑的一种供人居住和使用的空间或设施,如住宅、厂房、道路、桥梁、学校、体育馆、窑洞、水坝、港口、电站、寺庙等,为人类提供居住、生产、生活场所,而建筑材料直接影响着构筑物的完全性、耐久性、实用性、舒适性和艺术性。我国著名建筑大师梁思成说过,“凡一座建筑物皆因其材料而产生其结构法,更因此结构而产生其形式上之特征。”也就是说,建造建筑物或构筑物本质上都是所用建筑材料的一种“排列组合”(当然并非是简单罗列而是有机契合),建筑材料是建筑物不可缺少的物质基础。建筑及其结构形式和施工方法制约于建筑材料的品种、质量及其“组合”。建筑材料又直接影响着建筑的使用、牢固程度、外观、经济性、耐用程度和节能性能。可以说,没有建筑材料就没有建筑物。

第二,建筑材料是时代的象征。建筑材料是随着人类社会生产力的发展而发展的。随着社会生产力的发展,人们对土建工程的要求,不论是规模还是质量都越来越高,这就要求建筑材料与之相适应。反过来,如果建筑材料实现了这种要求,也就体现了相应社会生产力的水平。因此,随着社会的发展和文明的进步,留下了一系列建筑物甚至是人文标志。古代人们最初“穴居巢处”,后来凿石成洞、伐木为栅,人类敢于使用天然材料或原始“工具”构筑自己的“房屋”,这种“飞跃”就是建筑材料史上第一个里程碑。正如《周易·系辞》中说:“上古穴居而野处,后世圣人易之以宫室,上栋下宇,以待风雨”。第二个里程碑是人类史上的一大创举——烧土制品,包括陶器、砖瓦、烧制石灰和玻璃,由此也使人类社会进入文明发展期,直至现代高度发展的文明社会也离不开它,因此“陶器是人类从蒙昧时代到野蛮时代的标志”,砖瓦、石灰和木材堪称古代三大建筑材料。第三个里程碑就是1824年以来水泥和混凝土以至于后来的钢筋混凝土、预应力混凝土的使用,并由此翻开世界建筑史的新篇章。适应近代建筑需要而发展起来的现代混凝土(主要是超细粉和化学外加剂的使用及多功能化、生态化)已经成为现代建筑的主要材料之一,可以说1824年是古老建筑材料和现代建筑材料的分界年。之后,20世纪初石油工业突飞猛进地发展,1909年科学家用苯酚和甲醛经缩合反应合成酚醛树脂(也称为电木),有了人类最早的合成材料,后来的脲醛树脂、聚乙烯、聚己酰己胺,使有机高分子聚合物材料逐渐成为化学建筑材料的主力军,从而成为建筑材料的第四个里程碑,由此也发展成建筑材料另一大分支——化学建材。建筑材料的不断发展,表征着社会的进步、时代的发展,这才有万里长城、都江堰水利工程、秦阿房宫、明故宫,以及一些宏伟壮观的寺庙、楼阁、塔等著名建筑,才有石器时代、铁器时代及“秦砖汉瓦”之说。所有这些都说明当时建筑材料的生产及应用技术已达到相当高的水平,也证明当时社会的高度文明,从这种意义来说,建筑材料又是划分时代的一种象征。

第三,材料是科技的先导,建筑材料也是一样。可以说,新材料的研究与应用水平反映着一个国家的科技与工业水平,同时也为提高人民生活水平、增强国家安全、提高工业

生产率和经济增长奠定基础。其实,材料也是一切科学技术的先导,每一个重大科学技术与产品的出现无不都有材料作为支撑,现代科学技术无不以先进材料为基础。

在建筑领域,高性能混凝土的出现使得现代建筑成为可能。我国目前以钢索及膜材做成的结构最大跨度已达到 320m,而世界最高的建筑当属阿拉伯联合酋长国的高 828m、162 层的管状多塔结构体系的迪拜塔(后称哈利法塔),之所以它们能成为当今之最,这是与先进建筑材料的采用密不可分的。

第四,建筑材料铸就了建筑艺术,也丰富了中华文化。中国建筑的文化产生于中国这片特定的土壤,它离不开孕育中华民族的土壤,离不开特有的“秦砖汉瓦”,离不开对传统文化的继承和光大。这些丰富多彩的中国建筑,如从珠江流域的岭南建筑、四川地区的山地建筑到西藏的藏居、羌族的碉楼等,既是中华建筑史,也是一部中华文化史,充分体现了中国建筑的人、建筑、环境相融合,以及“天人合一”的哲学理念。正因为如此,中国的建筑才形成了自己特有的风格,如颇具华丽气质的北方四合院、开敞的苗族吊脚楼、秀丽的傣族竹楼和黄土高原的窑洞,以及东北的茅草屋等。中国建筑的大门、大窗、大进深、大屋檐使中国建筑豪放而不狂野;四角飞檐翘楚远挑,反映了中国建筑充满生气和活力;传统琉璃材料的使用使得中国建筑色彩丰富而格外高贵。而现代建筑对于建筑材料的使用更是淋漓尽致,如超高性能混凝土建筑、结构玻璃建筑、光伏建筑、钢管混凝土建筑等。

魅力建筑离不开魅力建材,任何构筑物的风格总是与其结构形式和构成材料,甚至环境的协调性息息相关。建筑师充分利用建筑材料的灵性,使中国建筑绚丽多彩。例如,石材给人以庄重、大方、永久感;砖瓦给人以稳重和信赖感;玻璃给人以轻快、通透、豪华、大空间感;木材朴实的特性给人以亲近感,仿佛回归自然而有生命力;钢材让人感觉坚实、华美、轻快;混凝土更感雄厚、稳重和坚实等。著名建筑师赖特认为,作为建筑师,不但要观察自然界浩瀚的生物世界的奇异生态,而且对建筑材料的内在性能(包括形态、纹理、色泽、力学和化学)等都要仔细研究。

建筑材料的研究对象主要是矿物材料和人造材料。矿物材料是指以天然矿物或岩石为主要原料,经不以提纯金属和化工原料为目的的加工处理所得到的材料;否则就是人造材料。建筑材料中的矿物材料主要是指砂、石,以及从自然界获取而直接用作建筑材料的一些原料(如建筑石材、天然石膏等)。人造材料主要有水泥、混凝土、钢材、防水材料、玻璃、陶瓷、高分子建筑材料等。本书所讲的建筑材料主要是指人造材料,并涉及部分矿物材料。

从全书来看,“建筑材料”这门学科所研究的内容包括:

- 1) 从多种角度,按不同条件对建筑材料进行分类。
- 2) 从材料科学观点出发,研究各种材料的组织与结构及其对材料性能的影响。
- 3) 按不同使用条件,研究材料的物理性质、力学性质和化学性质。
- 4) 从人文工程学方面,研究建筑材料的建筑文化。
- 5) 从外界环境条件与材料性质的关系出发,确定合适的使用条件,以及耐久性和环境协调性。

要正确使用建筑材料,一定要与法律法规、规范、标准,以及施工方法相结合,进行综合考虑。

传统建筑材料主要包括烧土制品(砖瓦、玻璃、陶瓷类)、砂、石、灰(石灰、石膏、水泥类),以及混凝土、钢材、木材和沥青。传统建筑材料的讲授方式大都采用“菜单式”,分别列章逐章讲述,一直沿用至今。一般教材都将第一章定义为“基本性质”,这也是传统教材的既定格式。实际上有些偏颇,有些内容并非属于基本性质,而用“基本特征”一词

比较合适。本书从宏观到微观甚至是细观加以详细论述，特别增加了宏观特征的经济性、环境适应性，深入介绍了微观结构的内容，并单列出“细观结构”；还把传统教材的“混凝土”一章中的外加剂及原来“气硬性胶凝材料”一章中的“水玻璃”放到胶体结构内容中。为此，就没有单独列出“气硬性胶凝材料”一章（传统教材的第二章），个人认为如此安排对于加强学生基础大有好处。

矿物建筑材料是新增加的一章。按照矿物材料的概念，传统教材中的“砂、石集料，混合材料，掺和料，天然石膏，轻烧镁材料”都放到了这一章节，突出“矿物材料”基本概念，对于拓展学生视野很有好处。

特别增加以前教材没有讲述的石灰石粉，让学生认识到前沿研究对保护生态环境非常重要。同时，还避免在“水泥”和“水泥混凝土”两章内重复讲述“混合材料”或“掺和料”。

研发多功能性、环境协调性（适应环境生存能力）和耐久性（抵抗环境作用能力）材料是建筑材料的发展趋势，环境协调性和耐久性在本书前面几章节进行了论述。统一设置第五章专门对材料的功能性加以讲述，并按照功能材料的种类进行分类，特别是引入新材料（包括纤维材料、纳米材料、微晶玻璃、泡沫混凝土、气凝胶材料、相变材料等），以适应现代建筑需求。

学好了“建筑材料”课程就相当于半个实业家。整个学习过程无不渗透着你选择和使用建筑材料的一种责任，无不彰显着建筑材料的历史和社会价值，无不潜移默化地激发你开发新型建筑材料的激情。这些点点滴滴都是你即将成为实业家或建筑材料学科专家的积淀，也是迈向你人生价值的开始。大家都知道，凡土木工程所涉及的各个学科和专业大都是团队协作，而建筑材料可以使你通过个人努力就能实现个人奋斗目标，并助你闯出一番事业。你想创业吗？你想在事业上有所成就吗？就好好学习“建筑材料”吧。记住，一份优秀的发明专利就能成就一个实业。一个创新者、实业者、引领者就将诞生在你们中间。

总之，本书是作者在多年教学和编写教材经验的基础上，重新构思编写的，但愿对当代教育有所贡献。

本书由王立久编著。具体分工如下：第1章～第4章由王立久编写，第5章由张婷婷编写。由于编者水平有限，书中难免有疏漏之处，恳请读者批评指正。

编者

2016年5月

目 录

前言

第 1 章 建筑材料的基本特征	1
1.1 建筑材料的聚集特征	1
1.1.1 宏观特征	2
1.1.2 微观特征	5
1.1.3 细观特征	8
1.2 建筑材料的工程特征	10
1.2.1 材料的力学性质	10
1.2.2 材料的环境作用	13
1.3 建筑材料的功能特征	22
1.3.1 材料的声学特性	22
1.3.2 材料的光学特性	24
1.3.3 材料的热学特性	26
1.3.4 材料的电学性能	27
第 2 章 矿物建筑材料	29
2.1 集料	29
2.1.1 集料的定义与分类	29
2.1.2 集料的性质	30
2.1.3 集料的验收与堆放	37
2.2 矿物掺和料	38
2.2.1 粉煤灰	38
2.2.2 硅灰	41
2.2.3 沸石粉	43
2.2.4 粒化高炉矿渣	44
2.2.5 石灰石粉	45
2.3 石灰、石膏、轻烧镁	46
2.3.1 石灰	46
2.3.2 石膏	48
2.3.3 轻烧镁	51
第 3 章 水泥	53
3.1 硅酸盐水泥	53
3.1.1 硅酸盐水泥的生产和组成	53
3.1.2 硅酸盐水泥的水化反应及凝结硬化机理	57

3.1.3 硅酸盐水泥的技术性质和标准要求	65
3.1.4 硅酸盐水泥的使用	68
3.2 通用硅酸盐水泥	71
3.2.1 普通硅酸盐水泥	72
3.2.2 矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥	73
3.2.3 复合硅酸盐水泥	75
3.3 铝酸盐水泥	76
3.3.1 铝酸盐水泥的定义与分类	76
3.3.2 组成与水化	76
3.3.3 铝酸盐水泥的技术性质	78
3.3.4 铝酸盐水泥的特性与应用	79
3.4 其他水泥	79
3.4.1 其他组成水泥	79
3.4.2 特性水泥	81
3.4.3 专门用途水泥	84
3.4.4 水泥的选用	85
第4章 混凝土	87
4.1 混凝土的定义与分类	87
4.2 混凝土基本性质	89
4.2.1 混凝土拌和物性质	89
4.2.2 混凝土强度	97
4.2.3 混凝土变形性能	104
4.2.4 混凝土耐久性	109
4.3 混凝土配合比设计	115
4.3.1 混凝土强度离散的统计特性	115
4.3.2 四组分混凝土配合比设计数学模型	117
4.3.3 四组分混凝土配合比计算方法	119
4.3.4 六组分普通混凝土配合比设计	122
4.3.5 计算例题	129
4.4 建筑砂浆	130
4.4.1 建筑砂浆的技术性质	131
4.4.2 抹灰砂浆	138
4.4.3 砌筑砂浆	140
第5章 建筑功能材料	146
5.1 混凝土抗裂增强材料	146
5.1.1 钢材	146
5.1.2 纤维增强混凝土	159
5.1.3 几种常见的纤维混凝土	162

5.1.4 纳米材料	163
5.2 建筑围护材料	164
5.2.1 墙体砖	165
5.2.2 建筑砌块	179
5.2.3 现代围护材料	191
5.3 建筑装饰材料	192
5.3.1 装饰陶瓷制品	192
5.3.2 功能玻璃	194
5.3.3 涂料	196
5.3.4 天然装饰石材	198
5.4 隔断材料	200
5.4.1 防水材料	200
5.4.2 防火材料	201
5.4.3 保温材料	203
5.4.4 吸声材料	208
主要参考文献	210

第1章 建筑材料的基本特征

学习“建筑材料”课程的目的在于使用建筑材料时能做到合理选材、物尽其用。要做到这一点，就要求对材料的质量有相应的评定指标，并确定相应的选材准则。而这种指标或准则，都可归结为材料的功能或性质。实际上，功能或性质是建筑材料的一种表征，也是合理选材的尺度。

在建筑物中，处于不同部位的材料承受各种不同的外界因素作用，如：

- 1) 结构材料主要承受不同外力作用。
- 2) 地基基础材料除承受建筑物上部荷载作用外，还有冰冻和地下水作用。
- 3) 外围护材料常受到风、雨和日晒等大气因素作用。
- 4) 功能材料承受各种外界因素作用而尽最大可能地发挥相应功能和效用。

可知，建筑材料品种繁多，性能也多种多样，但它们之间存在着普遍的共同特征，称为建筑材料的“基本特征”，过去曾称为“基本性质”。但基本性质一说不够确切，因为有些对材料的表征不一定都能称为“性质”。

材料的基本特征归纳起来可分为聚集特征、工程特征和功能特征：

- 1) 聚集特征：包括材料宏观、细观和微观特征，涉及材料的组成与结构，以及与其相关的密度、孔结构等概念。
- 2) 工程特征：主要包括材料的力学、变形、破坏特性，材料的环境作用以及材料使用过程中的耐久性。
- 3) 功能特征：是指材料表现出的声、光、热、电、磁等物理特性，尤其是功能转换。

1.1 建筑材料的聚集特征

任何一种材料都依其使用环境而用其特有的聚集特征满足构筑物的工程特性和功能特性。

实际上，建筑材料的存在形式只有两类：

- 1) 一类是自身就能直接用于构筑物的产品，如水泥、砂、石、钢筋、沥青等建筑材料。
- 2) 另一类是借助建筑材料而形成的部品。只有建筑材料形成部品，才能使其体现出实用价值和商业价值。以建筑材料为基础，开发部品甚至成套技术或体系至关重要。

建筑（住宅）部品是指具有相对独立功能的产品，是由建筑材料、单独产品构成的部件、构件的总称，是构成成套技术和建筑体系的基础。部品体系按照建筑部位分为结构部品体系（支撑结构、楼板、楼梯）、外围护部品体系（围护墙、地面、屋面、门窗、防水、保温、装饰）、内装部品体系（分隔墙、内门、装饰部件、户内楼梯、壁柜）、厨卫部品体系（卫生间、换气风道、厨房）、设备部品体系（暖通空调、给水排水、燃气、电器照明、消防、电梯、新能源、管道等系统）、智能化部品体系（物业管理、安全消防、网络、家庭智能端）、小区配套部品体系（室外设施、停车设备、园林绿化、垃圾处理等）七大部品体系。

实现部品开发、生产和供应的标准化、系列化、通用化是实现住宅产业化的重要标志。目前，我国部品发展还比较落后，主要表现在部品标准化、系列化和模数化程度比较低，

建筑与部品模数难以协调,部品集成和配套能力弱,配套性和通用性较差。现在,我国部品所占比例仅占 20%,有的国家已达 80%。形成标准设计、系列开发、规模生产、配套技术、模数协调、技术集成的部品体系,实现住宅建设由粗放型向集约型转变,是推进住宅产业化的重要任务。

本节所述的宏观聚集特征主要是指传统建筑材料而少量涉及部品。

1.1.1 宏观特征

1.1.1.1 聚集状态

建筑材料的宏观聚集状态按孔隙尺寸可分为:

- 1) 致密结构:如金属、玻璃、致密石材等。
- 2) 孔隙结构:如水泥制品、石膏制品和砖、瓦等。
- 3) 多孔结构:如加气混凝土、泡沫水泥、泡沫塑料等。

按构成形态可分为:

- 1) 聚集结构:如水泥混凝土、砂浆、沥青混凝土、烧土制品、塑料等。
- 2) 纤维结构:如玻璃纤维、矿棉等。
- 3) 层状结构:如胶合板、纸面石膏板、夹芯板等。
- 4) 散粒结构:如砂、石、水泥、粉煤灰、珍珠岩、矿渣粉、尾矿粉等。

1.1.1.2 材料组成

材料组成主要是指化学组成和“基元”组成,用以表征材料的基本构成。

(1) 化学组成

化学组成是指材料的化学成分。无机非金属材料通常以各种氧化物含量的百分数表示;金属材料则以化学元素含量表示;有机高分子材料是由高分子化合物为主要组成的材料。

有机高分子材料的化学组成是由一种或几种简单的低分子化合物重复连接而成,由低分子化合物(也称单体)到高分子化合物(也称聚合物)的转变称为聚合,例如聚氯乙烯就是由氯乙烯单体聚合而成。

(2) 基元组成

基元是构成材料最基本的单元,无机非金属材料是由各种矿物构成的。矿物是指具有一定化学组成及结构特征的物质,它具有一定的分子结构和性质,是决定材料性质的主要因素。有些材料由多种矿物组成,如硅酸盐水泥中含有硅酸三钙、硅酸二钙、铝酸三钙、铁铝酸四钙四种矿物。

有机高分子化合物是由特定的结构单元多次重复构成,这种特定的结构单元称为链节,其重复个数称为聚合度。

团簇是由几个甚至上千个原子或其结合态单元相互作用结合在一起形成相对稳定的基本化学单元(相对稳定的微观或亚微观的集合体),空间尺度在纳米级左右,它是连接宏观与微观的物质结构的新层次,是纳米材料的基础,其性能与所含原子、原子数目、空间位置及相互作用有关,分为金属簇(如 Li_n 、 Cu_n 、 Hg_n)、非金属簇(如 C_n 、 N_n 、 Ar_n)和分子簇[如 $(\text{NaCl})_n$ 、 $(\text{H}_2\text{O})_n$]。

为研究方便,只从使用角度,将材料中化学成分及性质接近并与物理力学性质有一定

关系的成分划分为若干个组, 这些组称为组分。

1.1.1.3 材料的状态参数

材料的状态参数是指衡量材料“轻重”的指标参数, 通常是指密度、表观密度(体积密度)、堆积密度及空隙率等。

(1) 密度

材料的密度是指材料在绝对密实状态下单位体积的质量, 按式(1-1)计算, 即

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-1)$$

式中 ρ ——材料密度 (g/cm^3);

m ——材料在 105°C 烘干至恒重时的质量, 即绝干质量 (g);

V ——材料在绝对密实状态下的体积, 即不包含孔隙在内的固态所占的实体体积 (cm^3)。

材料密度的大小取决于材料的组成和显微结构。组成和结构确定的材料其密度应为定值。

测定密度时, 先把材料磨成细粉(除去孔隙), 经干燥后用李氏瓶测定其实体积。材料磨得越细所测得的体积越接近绝对体积。

(2) 表观密度

从微观角度看, 细粉颗粒内部仍有不少孔隙, 不可能绝对密实。为工程上使用方便, 有时把孔隙考虑在内计算材料的密度, 不含开口孔隙时称为表观密度 ρ_a , 有时也称为视密度, 即指材料在自然状态下(不含开口孔隙体积 V_k) 单位体积的质量; 而含有内部所有孔隙时, 单位体积的质量称为材料的体积密度 ρ_0 。表观密度按下式计算, 即

$$\rho_a = \frac{m}{V_a} \quad (1-2)$$

式中 ρ_a ——材料表观密度 (g/cm^3 或 kg/m^3);

V_a ——材料在自然状态下不含开口孔隙时的体积 (cm^3), $V_a = V + V_b$;

V_b ——材料闭口孔隙体积。

由于自然状态下材料的孔隙常吸收水分, 故表观密度值必须注明含水情况, 未注明的常指气干状态(表面干燥状态)。绝干状态下的表观密度称为干表观密度。

对于粉末材料, 如水泥、熟石灰粉等, 其颗粒很小, 与一般石料测定密度时所研碎制作的试样粒径相近似, 因而它们的表观密度特别是干表观密度值与密度值可视为相等。对于砂、石类散粒材料自然状态下的表观密度测定, 是将其饱水后在水中称量质量, 按排水法计算其体积(体积包括固体实体体积 V 和闭口孔隙体积 V_b , 而不包括其开口孔隙和颗粒间隙体积)。因此, 其粉体表观密度 ρ_a 由下式表示, 即

$$\rho_a = \frac{m}{V + V_b} = \frac{m}{m - m_w} \quad (1-3)$$

式中 m_w ——材料吸水饱和后在水中的质量。

对于块状材料的体积计算, 采用几何外形计算体积或蜡封法、静水天平置换法求体积。因此, 它包括材料全部体积即实体体积与所含全部孔隙体积之和, 因此有

$$\rho_0 = \frac{m'}{V_0} \quad (1-4)$$

式中 m' ——任意含水状态下材料的质量。

此处的 ρ_0 也称为体积密度。通常所指的体积密度是材料在气干状态下的，称为气干体积密度，简称体积密度；而在绝干状态下，则称为绝干体积密度，用 ρ_{0d} 表示。

严格来讲，体积密度和表观密度是绝对不同的两个概念，但是实际应用中为了简便而将两者统称为表观密度。

(3) 堆积密度

堆积密度是指粉状或颗粒材料在自然堆积状态下单位体积的质量，按下式计算，即

$$\rho_p = \frac{m}{V'_0} \tag{1-5}$$

式中 ρ_p ——材料的堆积密度 (kg/m^3)；

V'_0 ——堆积体积 (m^3)；

m ——质量 (kg)。

通常所指的堆积密度是材料在自然堆积状态和气干状态下的，称为气干堆积密度，简称堆积密度。材料在绝干状态时，则称为绝干堆积密度，以 ρ_{pd} 表示 ($\rho_{pd} = m/V'$)。

材料在堆积状态下，其堆积体积不但包括所有颗粒内的孔隙，而且还包括颗粒间的空隙。一般说来，对于散粒体材料按规定方法填实后单位体积的质量称为紧密密度。常见材料的密度、表观密度及堆积密度见表 1-1。

表 1-1 常见材料的密度、表观密度及堆积密度

材料名称	密度/ (g/cm^3)	表观密度/ (g/cm^3)	堆积密度/ (kg/m^3)
钢材	7.85	—	—
松木	1.55	0.40~0.80	—
水泥	3.10	—	1000~1600
砂	2.66	2.65	1450~1650
碎石 (石灰石)	2.60~2.80	2.60	1400~1700
花岗石	2.60~2.90	2.50~2.80	—
普通混凝土	2.60	2.10~2.60	—
普通黏土砖	2.50	1.60~1.80	—

因此，孔隙率 (孔隙占自然状态体积的百分数) 可表示为

$$P = \left(1 - \frac{\rho_{0d}}{\rho} \right) \times 100\%$$

空隙率 (散粒材料的空隙体积占堆积体积的百分数) 表示为

$$P' = \left(1 - \frac{\rho_{pd}}{\rho_{0d}} \right) \times 100\%$$

密实度 (即材料内部被固体物质所充实的程度) 表示为

$$D = \frac{\rho_{0d}}{\rho}$$

填充率 (即散粒体材料的堆积体积被固体物质填充的程度) 表示为

$$D' = \frac{\rho_{pd}}{\rho_{0d}}$$

1.1.2 微观特征

微观特征主要是指建筑材料的微观角度的一种表征,也是最基本的特征。显微结构是指材料内部原子、分子、离子等微观质点的空间排列方式。一般是借助电子显微镜及X射线衍射分析等方法进行研究,其分辨程度是以“埃”(用 $\text{\AA}$ 表示, $1\text{\AA}=10^{-10}\text{m}$)来计算的。

材料的许多性质,如强度、硬度、熔点、导热性、导电性等都是由它的微观结构所决定的。材料的微观结构,大体上可分为晶体结构、玻璃体结构、胶体结构三大类。

1.1.2.1 晶体结构

把相同质点(原子、分子、离子等)在空间按照一定的周期性排列成固定几何外形的固体称为晶体。

由中性原子构成的晶体称为原子晶体,其原子之间是由共价键来联系,具有很大的结合能,因而这种晶体的强度、硬度、熔点都比较高,如石英、金刚石等;由正、负离子所构成的晶体称为离子晶体,由于离子带有电荷使其靠静电引力(库仑力)形成的离子键来结合,比较稳定,其强度、硬度、熔点也比较高,但在溶液中要离解成离子,如 NaCl 、 MgCl_2 等;分子晶体是由中性分子构成的晶体,由于电荷的非对称分布而产生的分子极化,或是由于电子运动而发生的短暂极化所形成的一种结合力(范德华力),这种键结合力较弱,使其硬度和熔点都较低,多属于有机化合物;金属晶体是由金属阳离子排列成一定形状的晶格,晶格间隙中有自由运动的电子,靠库仑力结合,使金属具有良好的导热性和导电性。

如果将晶体内各质点近似地看成一些球体,则晶体结构就可看成是这些球体的堆积。球体堆积方式不同,球的直径不同,就组成各种类型的晶系(或称为“晶格”),如图1-1所示。

每个球周围与其紧密接触的其他球的数目称为该球的配位数。建筑材料中占重要地位的硅酸盐,其结构是由硅氧四面体单元 SiO_4 与其他金属离子结合而成,如图1-2所示。

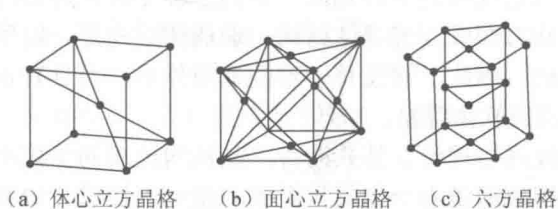


图 1-1 晶系

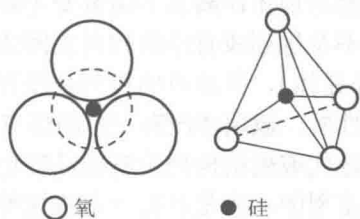


图 1-2 硅氧四面体示意图

硅氧四面体中硅的配位数为4, $\text{Si}-\text{O}$ 和 $\text{O}-\text{O}$ 的键长总是 $1.62\text{\AA}$ 和 $2.7\text{\AA}$ 。硅也可被铝所代替成为铝氧四面体,在同一结构中也可同时存在配位数为6的 Al^{3+} 形成铝氧八面体。 $\text{Si}-\text{O}$ 键的牢固性是使大部分硅酸盐硬度大和难熔的原因之一。在硅酸盐结构中,硅氧四面体能形成各种形式的“硅氧骨架”,按照目前已发现的硅氧骨架形式可分为五种类型,即岛状硅酸盐结构、环状硅酸盐结构、链状硅酸盐结构、层状硅酸盐结构和架状硅酸盐结构,如图1-3所示。

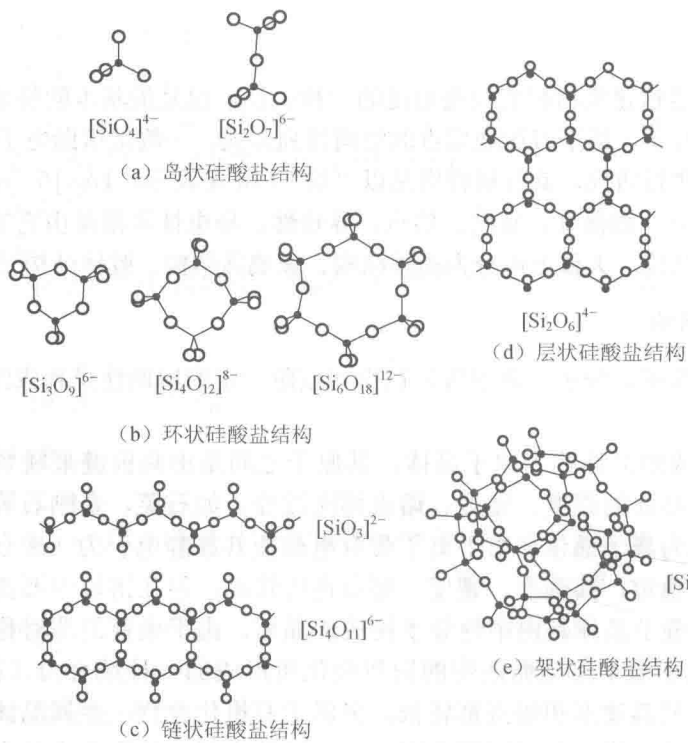


图 1-3 硅氧骨架的五种类型

岛状硅酸盐结构的典型矿物是橄榄石和硅酸二钙；环状硅酸盐结构矿物是堇青石；链状硅酸盐结构矿物是辉石和角闪石，如角闪石石棉；层状硅酸盐结构矿物是滑石和高岭石；架状硅酸盐结构矿物是长石、钾正长石和沸石。

1.1.2.2 玻璃体结构

晶态物体在高温下熔融变为液态，当温度骤然下降到低于凝固点温度时，熔体内部质点来不及排列成有序结构而凝固成固体状态即成为玻璃体结构。玻璃体结构是无定型物质（或非晶体），其质点的排列是没有规律的。因此，它没有一定的几何外形，而具有各向同性的性质。玻璃体没有一定的熔点，只出现软化现象。

近代玻璃结构理论有微晶理论和连续网络理论。其共同特点是认为玻璃的结构不纯粹是不定型的，而是具有一定规律性的，即玻璃是由一定化学组成的微元所构成，如石英玻璃和硅石的微元都是硅氧四面体。但玻璃中的结构微元不同于正常晶格的微小结晶，而是在一定程度上变了形的晶格，称为微晶，这种微晶的排列只有相邻近的部分有一定程度的规律性，越远规律性越差，这叫做近程有序、远程无序，如图 1-4 所示。

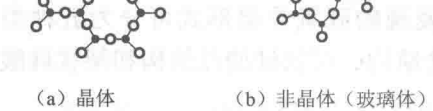


图 1-4 晶体与非晶体的原子排列示意图

玻璃体是化学不稳定结构，易与其他物质发生化学作用；如火山灰、炉渣、粒化高炉矿渣等玻璃体与石灰在有水的条件下起硬化作用；玻璃体在陶瓷烧结中起胶结剂作用。

1.1.2.3 胶体结构

胶体是指高度分散的分散体,更严格地说是胶态分散体。最简单的分散体系总是两相组成,其中形成粒子的相称为分散相,是不连续相;分散相以外的介质称为分散介质,是连续相。分散的粒子越小则分散程度越高,体系内的界面积也越大,表面粒子的大小直接影响体系的物理化学性质。分散程度是表征体系特性的重要依据,通常用比表面积表示。由此分为粗分散体系、胶体分散体系和分子分散体系。

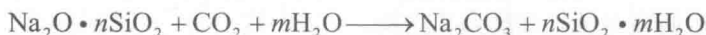
胶体由于脱水作用或加入电解质,会形成凝胶。凝胶具有固体性质,在长期应力作用下又具有黏性液体流动性质。可知,胶体是有别于晶体和玻璃体的一种特殊形体。

胶体在建筑材料中有广泛应用,如涂料、液态沥青、水玻璃硅胶、水泥凝胶、橡胶胶乳等都属于这类物质。

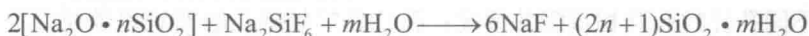
典型例子是水玻璃,俗称“泡花碱”,是碱金属氧化物和二氧化硅结合而成的一种溶解于水的透明的玻璃状溶合物,属气硬性胶凝材料(即在空气中可凝结硬化的胶凝材料),是极具发展潜力的未来硅质胶凝材料。常用的有 $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ (钠水玻璃) 和 $\text{K}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ (钾水玻璃)。 n 为 SiO_2 和 Na_2O 的物质的量的比,称为水玻璃的硅氧模数,简称模数。

其制备有干法和湿法两种,湿法是石英砂和氢氧化钠溶液在高压容器内用蒸汽加热并搅拌直至生成溶体状水玻璃;干法是将石英砂和碳酸钠磨细拌匀,在熔炉内经 $1300 \sim 1400^\circ\text{C}$ 温度熔化,然后在水中加热溶解成液体水玻璃。

液体水玻璃在空气中吸收二氧化碳,形成无定形硅酸,并逐渐干燥而硬化,反应式为



但此过程进行很慢,常引入氟硅酸钠 Na_2SiF_6 硬化剂,以促进硅酸凝胶加速析出,反应式为



其中,氟硅酸钠适宜用量为水玻璃用量的 $12\% \sim 15\%$,在此硬化过程中起主导作用的是硅胶。当硅胶逐渐失水时,胶粒结合成溶胶,变为有弹性的冻胶,最后成为具有固体性质的凝胶。这个凝胶化过程实际上是线型结构变成网状结构的高分子物质的过程,将集料黏结在一起发展为体型结构的高分子物质,获得较高强度。

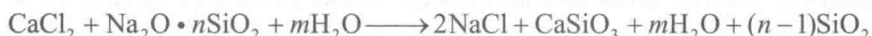
水玻璃的主要性质是模数和浓度。模数一般在 $1.5 \sim 3.5$,常用的是 $2.6 \sim 2.8$, $n=1$ 时能溶解于常温水中; n 加大后只能溶于热水中;当 $n>3$ 时,要在 4 个大气压以上的蒸汽中溶解。模数越大,水玻璃黏性越大,水溶性就越差。浓度是硅酸钠在溶液中的含量,通常用密度和波美度 ($^\circ\text{Be}'$) 表示,二者关系为

$$\text{密度} = \frac{145}{145 - ^\circ\text{Be}'}$$

在工业上常用水玻璃密度为 $1.3 \sim 1.4\text{g}/\text{cm}^3$,即 $^\circ\text{Be}'=33.5 \sim 41.5$ 。

在液体水玻璃中加入尿素,在不改变其黏度条件下可提高黏结力 25% 左右。

液体水玻璃可以和许多物质发生化学反应。如加入 HCl 可析出硅酸;水玻璃同氯化钙 (CaCl_2) 作用,最终生成水化硅酸钙,用于土壤加固,反应式为



用水玻璃浸渍或涂刷材料表面可提高密实度、强度和抗风化性能,提高耐久性,这主要是利用水玻璃与二氧化碳生成硅酸,与建筑材料中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成硅酸钙胶体填充孔隙

使材料致密。但水玻璃与石膏生成硫酸钠结晶, 体积膨胀易导致制品破坏。模数为 2.5~3.0 的水玻璃和 CaCl_2 溶液可将土壤固结, 提高抗渗性。以水玻璃为基料加入几种矾可以配制成防水剂, 与水泥调和可用于堵漏和抢修工程。以水玻璃为胶凝材料, 采用耐酸填料和集料可配成耐酸的胶泥、砂浆和混凝土, 用于防腐蚀工程。以水玻璃为胶结材料, 加入膨胀珍珠岩和一定量的赤泥或氟硅酸钠, 经配料、搅拌、成型、养护制成保温材料。

1.1.3 细观特征

细观特征是介于宏观与微观特征的一种表征方式, 对于材料来说更为直观。例如从细观角度, 可以把混凝土看成是水泥石、集料和界面三相组成的复合体, 混凝土宏观性能在很大程度上取决于这三相的体积比、各自力学性能及其相互作用。细观特征主要是指界面、孔洞和随机分布的微裂纹, 后两项可统一归类为孔结构。

1.1.3.1 孔结构

细观特征是介于宏观与微观特征的一种表征方式, 对于材料来说更为直观。例如严格地说, 孔结构属于细观结构, 由于孔结构在建筑材料领域具有重要地位而将其特别列出。

除金属和绝大多数塑料外, 目前所用建筑材料很多都含有孔隙。材料的孔结构对材料的许多性质有重要的影响, 如强度、变形、质量、导热性、吸水性、渗透性及耐久性等。对某种特定材料来说, 无论是晶体结构、玻璃体结构还是胶体结构, 其结构和组成都是确定的。从材料宏观结构角度来看, 影响材料性能的因素主要是孔结构。从广义来说, 孔隙也包含裂缝, 后两项可统一归类为孔结构。

(1) 孔结构内容

孔结构的主要内容包括: 孔隙率、孔径分布 (或称为孔级配) 和孔几何学。其中, 孔级配是指不同孔径的孔互相搭配的情况; 孔几何学包括孔的形貌和排列。

我国著名科学家吴中伟先生在 1973 年提出对混凝土中的孔级划分和分孔隙率 e 及其影响系数 X 的概念。孔级划分、分孔隙率与影响系数的关系如图 1-5 所示。

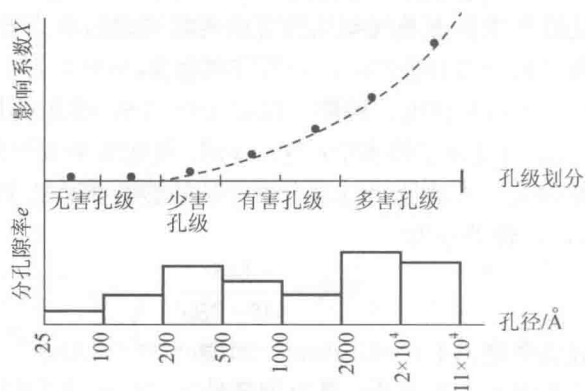


图 1-5 孔级划分、分孔隙率与影响系数的关系

根据图 1-5, 如增加 500Å 以下的孔, 减少 1000Å 以上的孔, 对混凝土的性能可有显著改善。

建筑材料常以孔隙率作为材料密实程度的指标, 如图 1-6 所示。在自然状态下, 材料体