



同济大学本科教材出版基金资助



建筑材料科学基础

高峰 朱洪波 编著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS



同济大学本科教材出版基金资助

建筑材料科学基础

高 峰 朱洪波 编著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书分为三篇共 8 章,第一篇建筑材料概述,包括第 1 章建筑材料的研究内容和第 2 章建筑材料的基本性质;第二篇建筑结构材料,包括第 3 章金属结构材料,第 4 章无机非金属结构材料和第 5 章高分子结构材料;第三篇建筑功能材料,包括第 6 章金属功能材料,第 7 章无机非金属功能材料和第 8 章高分子功能材料。

本书融合了材料科学、房屋建筑学、建筑材料学、建筑材料质量检测、建筑物理、材料力学、建材产品设计、色彩学、矿物岩石学、木材学等多方面知识,引用了大量技术标准,对有关问题进行了案例分析。全书内容充实,面向工程实际,文字通俗易懂。本书可作为材料科学与工程专业建筑材料方向的本科生教材,也可作为建筑施工、建筑材料生产企业技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

建筑材料科学基础/高峰,朱洪波编著. —上海:同济大学出版社,2016.8

ISBN 978-7-5608-6417-4

I. ①建… II. ①高…②朱… 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(2016)第 136863 号

同济大学本科教材出版基金资助

建筑材料科学基础

高 峰 朱洪波 编著

责任编辑 高晓辉 葛永霞

责任校对 张德胜

封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社

www.tongjipress.com.cn

(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 同济大学印刷厂

开 本 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张 28.5

字 数 711 000

版 次 2016 年 8 月第 1 版 2016 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-6417-4

定 价 56.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

编者的话

建筑材料是否可以称为科学,是存在争议的。

从古至今,建筑材料的教学与研究主要侧重建筑材料的工程性质、生产及应用,在科学体系中属于工程领域,可以称之为建筑材料工学。而从字面上看,建筑材料科学应该属于科学体系中的应用科学领域,类似于冶金学、陶瓷学,但建筑材料种类庞杂、性能差异巨大,很难建立涵盖全部建筑材料的清晰的科学体系。

从大材料的角度看,自 20 世纪 60 年代从美国发源的材料科学与工程,发展至今已不断充实完善,将其嫁接到建筑材料上,就是建筑材料科学。但是,材料科学的研究方法以微观、理论分析为主,而建筑工程中,对建筑材料的生产及应用注重宏观性能、实物检测,两者之间存在巨大落差。材料科学综合了金属学、陶瓷学、高分子材料学、复合材料学等学科内容,然而,钢材属于冶金行业,新型陶瓷与传统的烧土制品相去甚远,高分子材料在建筑中基本上不用作结构材料,复合材料行业主要关注玻璃钢、碳/碳、陶瓷增韧等方面,这样看来,建筑材料的主角——钢筋、砖瓦、混凝土、木材、石材等,在材料科学里备受冷落。

将材料科学简单地用于建筑材料,就好比将树林里歌唱的小鸟变成了博物馆里的标本,虽然精确但缺乏生机。用材料科学的研究方式将建筑材料肢解成化学键、晶格缺陷、界面、相等,破坏了建筑材料原有的存在条件,再人为地重新拼接起来,然而再也回不到初始状态了。混凝土行业流行这样一句双关语,What is abstract can not be concrete,字面意思是凡是抽象的就不是具体的,内含意思是凡是抽象的就不是混凝土(英文单词 concrete 同时有具体的、混凝土等译义),其本质是反映这样一种现实:混凝土是由硬化水泥浆、砂石骨料、孔隙等组成的,将它们拆分开来,分别对各自性能进行科学研究(建立理论模型、经验公式等抽象),再将这些性能组合起来,这样得到的结果与实际混凝土的性能并不一致。美国著名的混凝土专家梅塔(P. Kumar Mehta)在《混凝土——结构、性能与材料》一书的前言中告诫,对于预测混凝土性能的那些模型、数学抽象、计算机程序,务必保持谨慎。显然,材料科学在精细陶瓷、纳米材料等方面的进展是引人瞩目的,但在建筑材料领域进展甚微,因为建筑材料具有粗放性的特点,类似于烧结黏土砖这样的多孔性材料、混凝土这样的非均质材料,测试结果的离散性很大,很难建立精确的模型或公式,所以 Griffith 在研究材料脆性断裂时,选择的是玻璃而非混凝土。材料科学像一把精巧的手术刀,建筑材料像一棵大树,建筑材料科学则是一把砍树的斧子。

美国建筑材料著名学者 J. Francis Young、Sidney Mindess 等写的教材《土木工程材料科学与技术》,将材料科学与建筑材料进行了有机结合。受此启发,本书作者结合多年教学体会,融合了材料科学、房屋建筑学、建筑材料学、建筑材料质量检测、建筑物理、材料力学、建材产品设计、色彩学、矿物岩石学、木材学等多方面知识,引用了大量技术标准,对有关问题进行了案例分析,在同济大学教学改革项目资助下,完成了本书的编写。

本书内容分为三部分:第一篇建筑材料概述,包括第 1 章建筑材料的研究内容和第 2 章

建筑材料的基本性质;第二篇建筑结构材料,包括第3章金属结构材料,第4章无机非金属结构材料,第5章高分子结构材料;第三篇建筑功能材料,包括第6章金属功能材料,第7章无机非金属功能材料,第8章高分子功能材料。其中,第一篇、第二篇、第6章由高峰编写,第7章、8章由朱洪波编写,第2.1.4节、第4.2节、第5.2节由高峰、朱洪波共同编写。本书编写大纲得到了同济大学材料学院张雄教授的悉心指导,在此谨致谢意。

建筑材料最终要应用于建筑工程、满足工程需要,因此无论学习怎样的科学理论,其价值在于能成功地服务于实践。本书在建筑材料科学的教学方面进行了一些探索,由于作者水平所限,其中难免存在疏漏与不足,敬请读者不吝指正,以共同促进建筑材料科学的健康发展。

前言

材料的种类繁多,按应用领域,分为医用材料、纺织材料、电子材料、建筑材料等。不同种类的材料之间,性能差异可能非常巨大,而同一大类的材料一般具有相似的共性。建筑材料的一般特点是:

(1) 用量大,这就涉及资源、储运、成本等方面的问题。建筑材料的运输半径从经济方面考虑应不超过 500 km,建筑材料的生产需要消耗大量的黏土、砂石、木材等自然资源,而现代工业生产同时产生大量的化工废渣、尾矿、建筑渣土等废弃物,如果这两方面能进行有机的结合,变废弃物为再生资源,就会在降低成本、保护自然资源、减少环境污染等方面产生巨大的社会经济效益。

(2) 有安全耐久性要求。建筑物一般暴露于大气环境中,常年经受风吹日晒、雨淋霜冻,偶尔还可能遭遇地震、火灾、爆炸、洪水等极端作用,要能在设计使用年限内屹立不倒,必须具有一定的耐久性;同时,建筑物往往与人体距离较近,建筑材料的辐射、挥发性有机化合物(VOC)等指标应符合规范要求。

(3) 涵盖面广。这表现在多个方面:①建筑材料主要涉及建材生产企业,建筑施工企业,地质、采矿、机械制造、节能环保等行业;②建筑用于民居、厂房、道路、港口、水利设施、军事设施等,不同的用途对建筑材料有不同的基本要求,如民居要求保温隔音,厂房要求抗重载耐腐蚀,道路要求耐磨耐候性,水工要求耐冲刷抗冻性,等等;③建筑材料种类繁多、性能差异很大,如用于房屋建筑的梁、板、柱、墙等承重构件的材料,要求其具有足够的强度、刚度、耐久性,而不必要求其外观的装饰性,用于建筑物的保温、防水、装饰等目的的功能材料,在使用时依附于结构材料上,因此对其强度等力学性能方面的要求不高,这样来看,讨论建筑材料的性能就不是针对一种材料,而是面对一大批材料,应分门别类进行讨论;④单纯就建筑材料行业本身而言,涉及原材料供应、产品生产、性能检测、标准制定及行业管理、教学与科研等方面。

(4) 可选择余地较大。如建一幢房屋,原始人用石块、树枝、兽皮等建造;林区建木屋,山区建石屋;农民自力更生可以建土坯房、砖瓦房;现代化城市用混凝土、钢材建造。所以对于某一特定的项目,可选用的建筑材料不是唯一的,在作出合理选择的时候应考虑建筑物的性质、当地建筑材料供应情况、建筑施工技术、投资规模、建筑物所处环境条件、政策导向等因素。

(5) 建筑材料的生产属于粗放式,产品的尺寸精度往往是毫米级甚至厘米级,原材料的杂质含量、产品的性能波动往往超过 5%,甚至 10%,生产条件往往是高污染、高能耗,典型的如烧结黏土砖的土窑、混凝土现场搅拌。虽然不乏一些现代化的大型生产企业在这方面管理较严,但建筑材料从业企业众多、鱼龙混杂,目前存在的问题仍然较多。

(6) 在建筑材料粗陋的表象之下,蕴含着科技的进步。以水泥混凝土为例,高强混凝土、轻质混凝土、泵送混凝土等技术,成就了多姿多彩的现代化城市建筑,这其中包含了建筑

材料科研人员不懈的努力,体现了水泥化学、混凝土外加剂技术、混凝土流变学等知识在工程实践中的成功应用。建筑材料的研究,早已不再只是工匠式的经验探索,材料科学的发展也惠及建筑材料行业,因此相关的工程技术人员应该学习掌握一些必要的理论知识和专业技能。

对于种类繁多的研究对象,一个简单有效的处理方法是对其进行分类。通常,建筑材料按组成为金属材料、无机非金属材料、高分子材料;按作用分为结构材料、功能材料。本书内容基本按这种方式编排。

科学体系分为三个层次:基础科学、应用科学和工程。基础科学主要包括数学、物理学、化学、力学;应用科学包括生命科学、地学、冶金学等;工程包括地质工程、医学、机械工程、化学工程、土木工程、电气工程等。材料科学属于应用科学,本书内容涉及应用科学、工程,更偏重于工程。

我国高等院校本科教育专业设置分为三个层次:学科门类、学科大类(一级学科)、专业(二级学科)。我国高校目前开设有12个学科门类、88个一级学科、358个二级学科,每个专业都有十几门专业课程。本书内容属于工学(门类代码08)、材料科学与工程(一级学科代码0805)、材料物理与化学(二级学科代码080501)、材料学(二级学科代码080502)、材料加工工程(二级学科代码080503),少量内容涉及矿物岩石学(二级学科代码070901)、结构工程(二级学科代码081402)。可以看出,在我国高校学科设置中,没有建筑材料这一专业,但是在教学计划中,《建筑材料》(也称《土木工程材料》)是作为材料科学与工程、土木工程、建筑工程管理等土建类专业的专业基础课列出的,而且在国家一级注册建筑师资格考试、注册岩土工程师资格考试中,有建筑材料(也称土木工程材料)方面的考试内容。

不同学科有各自的专业分工,但有些新兴学科是跨专业的,材料科学即是如此。材料科学的形成,是固体物理、无机化学、有机化学、物理化学、力学、金属学、陶瓷学、高分子材料学、复合材料学等学科发展、融合的结果。材料科学家本质上偏重化学,结构工程师注重力学。材料工程师应该两者兼顾,工程应用偏重力学,材料研究偏重化学。本书在涉及跨专业内容时,只做入门式介绍,读者可依据参考书目自行选择深入研究。

科学的特点之一是严谨性,结论可加以验证。检验应按照统一的尺度,因此产生相应的标准、规范。虽然目前高校还没有设立专门的标准专业,但是在实际工作中,标准具有十分重要的作用。

1989年4月1日起施行的《中华人民共和国标准化法》,对下列技术要求进行了统一:①工业产品的品种、规格、质量、等级或者安全、卫生要求;②工业产品的设计、生产、检验、包装、储存、运输、使用的方法或者生产、储存、运输过程中的安全、卫生要求;③有关环境保护的各项技术要求和检验方法;④建设工程的设计、施工方法和安全要求;⑤有关工业生产、工程建设和环境保护的技术术语、符号、代号和制图方法。

GB/T 20000.1—2002《标准化工作指南第1部分:标准化和相关活动的通用词汇》第2.3.2项对标准的定义是:为了在一定的范围内获得最佳秩序,经协商一致制定并由公认机构批准,共同使用的和重复使用的一种规范性文件(标准宜以科学、技术和经验的综合成果为基础,以促进最佳的共同效益为目的)。

按使用范围,标准分为国际标准、区域标准、国家标准、行业标准、地方标准、企业标准;按内容,标准分为产品标准、工程建设标准、方法标准、安全标准、卫生标准、环境保护标准、

服务标准、过程标准、数据标准等;按属性,标准分为基础标准、技术标准、管理标准和工作标准等;按标准实施的强制程度,标准分为强制标准、暂行标准和推荐性标准。详见 ISO(国际标准化组织)与 IEC(国际电工委员会)联合发布的第 2 号指南《标准化和有关活动的一般术语及其定义(1991 年第六版)》。

标准文件包括标准、技术规范、操作规程和法规等文件。在我国,对设计、施工、制造、检验等技术事项所作的统一规定称为规范;对工艺、操作、安装等具体技术要求和实施程序所作的统一规定称规程;对一定时间、一定条件下、生产某种产品或进行某种工作消耗人力、物力、财力所规定的限额叫定额;对工作的原则、方法或概念等提出指导性或推荐性要求的文件是指南或导则。

建筑工程中常用的标准有:基础标准,如 GB/T 8075—2005《混凝土外加剂定义、分类、命名与术语》;产品标准,如 GB 23439—2009《混凝土膨胀剂》;方法标准,如 GB/T 8077—2012《混凝土外加剂匀质性试验方法》;工程建设标准,如 GB 50119—2013《混凝土外加剂应用技术规范》。

国内标准有国家标准、行业标准、地方标准和企业标准。国家标准包括 GB 国家标准, JJF 国家计量技术规范, JJG 国家计量检定规程, GHZB 国家环境质量标准, GWPB 国家污染物排放标准, GWKB 国家污染物控制标准, GBn 国家内部标准, GBJ 工程建设国家标准, GJB 国家军用标准;与建筑、建材有关的行业标准有 YS 有色冶金行业标准, YB 黑色冶金行业标准, XB 稀土行业标准, TB 铁道行业标准, SY 石油行业标准, SL 水利行业标准, SH 石油化工业行业标准, LY 林业行业标准, JT 交通行业标准, JGJ 建筑行业工程建设规程, JG 建筑行业标准, JC 建材行业标准, JB 机械行业标准, HJ 环保行业标准, HY 海洋行业标准, HGJ 化工行业工程建设规程, HG 化工行业标准, DZ 地质行业标准, CJJ 城建行业工程建设规程, CJ 城建行业标准, CECS 工程建设推荐性标准等;地方标准例如北京市地方标准 DB11/T 968—2013《预制混凝土构件质量检验标准》,上海市地方标准 DGJ 08—2117—2012《装配整体式混凝土结构施工及质量验收规范》等;企业标准的编号一般以“Q”打头。

常用国外标准有 ISO 国际标准, ANSI 美国国家标准, BS 英国国家标准, DIN 德国国家标准, NF 法国国家标准, JIS 日本工业标准, ASTM 美国材料试验协会标准等。

在学习建筑材料科学知识、选用建筑材料的时候,应注意理论联系实际,以满足工程应用的要求作为研究动力和目标。建筑材料是一门实验学科,许多原理都是经验的总结。

了解建筑材料的一个有效方法是做实验。建筑材料的常规工程检测方法、建筑材料课程教学实验、建筑材料的微观测试及化学分析方法等,都是很好的实践教学内容,多看一些工程标准(施工质量验收规范、应用技术规程、检测技术标准、设计规范、产品标准等),适当参与有关资质证书考试(监理工程师、注册建筑师、见证取样员等)也是很好的实践形式。

本书穿插有一些案例分析,有助于读者开拓思路,灵活运用所学知识。这也是一种形式的实践。

编者

2016 年 7 月

目 录

编者的话
前 言

第一篇 建筑材料概述

第 1 章 建筑材料的研究内容	1
1.1 材料科学基本原理	1
1.1.1 材料的组成	2
1.1.2 材料的结构	4
1.1.3 材料的性能	6
1.2 建筑材料的分类	8
1.2.1 按组成分	8
1.2.2 按作用分	9
1.2.3 按惯例分	9
1.3 建筑材料的发展历程	10
1.4 建筑材料的研究方法	11
1.4.1 材料开发	11
1.4.2 材料性能分析	14
1.4.3 材料生产工艺	14
1.4.4 材料测试方法	14
1.4.5 产品设计	15
1.4.6 产品成本分析	16
1.4.7 计算机应用	17
1.5 建筑材料与建筑结构	17
1.5.1 房屋的组成	17
1.5.2 建筑的分类	18
1.5.3 建筑结构分类	20
1.5.4 建筑构件	21
1.5.5 建筑节能	21
1.6 建筑材料质量控制	22
1.7 绿色建筑材料	23
1.7.1 绿色建材的特点	23
1.7.2 绿色建材认证	24
参考文献	25

第2章 建筑材料的基本性质	27
2.1 建筑材料的物理性质	27
2.1.1 重量与密实程度	27
2.1.2 与水有关的性质	32
2.1.3 与热有关的性质	36
2.1.4 与声有关的性质	47
2.1.5 与光有关的性质	56
2.2 建筑材料的力学性质	65
2.2.1 强度	66
2.2.2 受力变形	77
2.2.3 断裂	87
2.2.4 硬度	91
2.2.5 耐磨性	92
2.3 建筑材料的耐久性	93
2.4 材料的表面性质——表面张力	94
参考文献	96

第二篇 建筑结构材料

第3章 金属结构材料	98
3.1 金属材料的结构与性能	99
3.1.1 金属材料的结构	99
3.1.2 金属材料的性能	100
3.2 钢材的分类	103
3.2.1 按含碳量分类	103
3.2.2 按化学成分分类	103
3.2.3 钢的其他分类	105
3.2.4 钢产品分类	106
3.2.5 建筑用钢材	107
3.3 钢结构用钢	108
3.4 钢筋混凝土用钢	109
3.4.1 普通钢筋	109
3.4.2 预应力钢筋	112
3.4.3 其他类	115
3.5 建筑钢材的基本性质	121
3.5.1 力学性能	121
3.5.2 工艺性能	124
3.5.3 钢材的冷加工	125
3.5.4 化学成分对钢材性能的影响	126

3.6 铝及铝合金	128
3.6.1 铝及铝合金的分类	128
3.6.2 铝及铝合金的特性	128
3.6.3 铝合金结构设计要点	129
3.6.4 建筑工程常用的铝合金结构	130
3.7 铜及铜合金	131
3.7.1 铜及铜合金的分类	131
3.7.2 铜及铜合金的应用	133
参考文献	133
第4章 无机非金属结构材料	134
4.1 水泥混凝土	137
4.1.1 概述	137
4.1.2 水泥混凝土的组成材料	144
4.1.3 基本性质	179
4.1.4 配合比设计	197
4.1.5 质量控制	216
4.1.6 预制混凝土产品设计初步	220
4.1.7 混凝土结构的修复及加固	234
4.2 砖与砌块	235
4.2.1 砖	235
4.2.2 砌块	242
4.3 石材	248
4.3.1 岩石的组成与分类	248
4.3.2 石材的基本性质	255
4.3.3 石材的应用	260
参考文献	264
第5章 高分子结构材料	266
5.1 木材	266
5.1.1 木材的分类	266
5.1.2 木材的构造	267
5.1.3 木材的性质	273
5.1.4 木材的处理	296
5.1.5 木材的综合利用	301
5.2 沥青混凝土	306
5.2.1 沥青混凝土的分类	306
5.2.2 沥青混凝土的组成与结构	308
5.2.3 沥青混凝土的性质	311

5.2.4 沥青混凝土在道路工程中的应用	314
5.2.5 沥青混凝土在水利工程中的应用	319
5.3 合成高分子材料	320
5.3.1 结构用建筑塑料	320
5.3.2 建筑橡胶结构材料	328
5.3.3 建筑结构用胶黏剂	332
5.3.4 土工合成材料	334
参考文献	336

第三篇 建筑功能材料

第6章 金属功能材料	337
6.1 金属防水材料	337
6.1.1 金属板防水层	337
6.1.2 金属止水带	338
6.2 金属绝热材料	339
6.3 金属吸声材料	340
6.4 金属装饰材料	342
6.4.1 金属吊顶板	342
6.4.2 金属饰面板	342
6.4.3 金属饰面防火板	343
第7章 无机非金属功能材料	344
7.1 防水透水材料	344
7.1.1 防水砂浆	344
7.1.2 防水混凝土	344
7.1.3 瓦	345
7.1.4 透水混凝土	355
7.2 保温绝热材料	357
7.2.1 保温绝热材料的结构及物理性能	358
7.2.2 岩棉	362
7.2.3 玻璃棉	364
7.2.4 膨胀珍珠岩	364
7.2.5 陶粒	365
7.2.6 泡沫水泥	369
7.2.7 加气混凝土	371
7.2.8 微孔硅酸钙	372
7.2.9 墙体保温系统	372
7.3 防火耐火材料	379

7.3.1 概述	379
7.3.2 硅酸铝质耐火材料	381
7.3.3 硅质耐火材料	383
7.3.4 镁质耐火材料	383
7.3.5 熔铸耐火材料	385
7.3.6 轻质耐火砖	386
7.3.7 不定形耐火材料	386
7.3.8 含碳耐火材料	388
7.4 建筑玻璃	390
7.4.1 玻璃的性质	390
7.4.2 普通平板玻璃	391
7.4.3 深加工玻璃制品及其应用	392
7.5 吸声材料	396
7.5.1 吸声材料(结构)的分类	396
7.5.2 多孔性吸声材料	399
7.5.3 共振吸声结构	403
7.5.4 其他吸声结构	404
7.6 隔声材料	406
7.6.1 空气声隔绝	406
7.6.2 固体声(撞击声)隔绝	408
第8章 高分子功能材料	409
8.1 防水材料	409
8.1.1 研究与应用现状	409
8.1.2 沥青	411
8.1.3 防水卷材	422
8.1.4 防水涂料	433
8.1.5 密封材料	436
8.2 绝热材料	438
8.2.1 泡沫塑料	438
8.2.2 碳化软木	439
8.2.3 植物纤维复合板	439
8.2.4 蜂窝板	439
8.3 采光材料	439
8.3.1 玻璃钢	439
8.3.2 聚碳酸酯板	440

第1章 建筑材料的研究内容

1.1 材料科学基本原理

材料科学是研究材料的组成、结构、性能及其相互关系的学科。对于建筑材料研究,经常用到的一项材料科学基本原理是材料的性能取决于其组成、结构。这句话具有高度的概括性和普适性。

材料的性能有很多种,如质量特性(表征指标为密度等)、密实度(表征指标为孔隙率等)、导热性(表征指标为导热系数等)、耐水性(表征指标为软化系数)等,影响各种性能的因素也有很多,如内部因素、外部因素、物理作用、化学作用等,同时材料的种类又非常多,因此以“材料的性能取决于其组成、结构”为指针,有助于理清思路,解决问题。

【案例分析 1-1】 石膏制品的耐水性较差(软化系数为 0.3 左右),试分析原因,并提出解决方案。

分析原因:石膏制品的强度主要来源于其水化产物($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)的干燥结晶,而该水化产物有一定的水溶性,所以造成石膏制品遇水后强度降低,其他因素还有石膏具有亲水性、石膏硬化后形成较多的毛细孔,这使得水分能够进入石膏制品内部,造成整体破坏。在这个分析中,材料的性能是耐水性(存在问题是耐水性差),材料的组成是 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (具有水溶性、亲水性),材料的结构是富含毛细孔(特点为细小、开放、连通的孔)。

解决方案:①提高水化产物的耐水性,如在石膏胶凝材料中掺入适量的水硬性材料(如水泥)、活性掺合料(如矿渣、石灰、粉煤灰、硅藻土)或聚合物可改善其耐水性。例如,石膏与矿渣粉等材料配制成的胶凝材料,具有水硬性(软化系数大于 0.9),28 天强度比纯石膏高 2~3 倍。原因是水化产物中有一定的水硬性物质,起骨架支撑作用,帮助遇水软化的 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 不至溃散。②石膏制品表面做防水处理,如表面贴防水纸、涂憎水剂、做表面覆盖(贴瓷砖等),使水无法进入石膏制品内部。③采用建筑构造措施,如墙体做垫脚、散水,屋面做挑檐、女儿墙等,使石膏制品避免遇水。在方案①中,提高水化产物的耐水性的想法是从材料的组成方面考虑,具体的材料配方是通过反复试验确定的;方案②是从材料的结构方面考虑,具体做法是在实际生产中常用的;方案③是从材料以外的角度考虑,作为一种辅助措施,实际对材料的性质没有改变。

1.1.1 材料的组成

1. 原子

物质是无限可分的,对于材料研究而言,原子是材料的最小组成单位。

原子由原子核与核外电子组成。根据原子的量子力学模型,核外电子按层分布(第一层至第七层常用字母 K、L、M、N、O、P、Q 表示)。

具有相同的核电荷数(即核内质子数)的一类原子的总称为元素,元素周期表迄今已排到 118 号,说明这个世界上目前为止已发现 118 种原子。

(1) 元素的性质

元素的性质主要取决于最外层电子。在化学反应中,参与化学键形成的电子称为价电子,价电子的数目取决于原子核外电子层结构。

元素的金属性指其原子失去电子而变成正离子的性质,元素的非金属性指其原子得到电子而变成负离子的性质。元素的金属性和非金属性的强弱,可以用电负性来衡量。元素的电负性指原子在分子中吸引电子的能力。元素的电负性数值越大,非金属性越强。一般地,非金属的电负性大于 2,金属的电负性小于 2。元素周期表中,金属元素 87 种(其中人工合成元素 15 种),非金属元素 16 种,稀有气体 6 种,合计 109 种。金属原子的最外层电子数少,距离原子核较远,电离能低、电子亲和力小,因此大多易给出价电子,化学性质活泼并具还原性,在化合物中通常显示正氧化值。金属参与水溶液中反应的还原能力,可以用标准电极电位进行比较。除氢外,非金属元素的外电子层结构为 $ns^2 np^{1\sim 5}$,外电子层上有 3~7 个电子,它们倾向于获得电子而呈负氧化态。但是在一定条件下,它们也可以部分或全部发生价电子的偏移而呈正氧化态,为此非金属元素一般都有两种或更多种的氧化值。

(2) 原子的存在形式

绝大多数金属在自然界中以化合态存在。

自然界中非金属元素主要以化合态存在,也有少数以游离单质状态存在(如 O_2 、 N_2 、S、C 等)。非金属单质大多是由两个或两个以上的原子以共价键相结合。非金属元素按其单质的结构和性质可分为三类:①小分子物质,如 X_2 (卤素)、 O_2 、 N_2 、 H_2 等,通常为气体,固体时为分子晶体,熔点、沸点都很低。②多原子分子物质,如 S_8 、 P_4 、 As_4 等,通常为固体,为分子晶体,熔点、沸点也不高(但比小分子物质高),易挥发。③大分子物质,如金刚石、晶体硅和硼等,为原子晶体,熔点、沸点都很高,不易挥发。在常见的非金属元素中,F、Cl、Br、O、S、P、H 较活泼,而 N、B、C、Si 在常温下不活泼。活泼的非金属易与金属元素形成卤化物、氧化物、硫化物、氢化物或含氧酸盐等,且非金属元素之间亦可形成卤化物、氧化物、氢化物、无氧酸或含氧酸。

原子结合形成分子,分子内部结构主要涉及化学键和分子的空间构型,分子的内部结构决定了物质的性质。

2. 物质的结合力

图 1-1 是原子间作用力示意图。当原子相互距离为无限远时,彼此之间不存在相互作用;当原子相互靠近时,会产生相互作用,既有吸引,也有排斥。吸引来自异性电荷的库仑作用力;排斥来自同性电荷的库仑作用力,以及由泡利不相容原理决定的电子间作用力。在稳定的凝聚态时,原子间距离使吸引与排斥合力为零。

当你敲碎一块玻璃时,克服的是什么力?如果你将碎玻璃重新拼接在一起,那个力怎么又不存在了?

对于上述问题的解释是:敲碎玻璃时,克服的是原子间的引力,所做的功有一部分转化成新形成断面的表面能。将碎玻璃重新拼接在一起,接触面上只有部分的点接触,并未使大部分的原子足够的靠近,因此没有产生原子间作用力。在钢筋闪光对焊中,拟连接钢筋的端部被电加热至软化,同时施加压力予以顶锻,使钢筋焊合,这种焊接没有使用焊剂,钢筋的连接力完全靠钢筋的原子间引力。

分子间引力的作用范围一般为 $3\sim 5\text{ \AA}$ (10^{-10} m)。

距离很近的原子间会产生强烈作用力,称为化学键,化学键一般可分为三种主要类型:①离子键,由正负电荷的相互吸引而造成,如镁和氧结合形成 MgO ,放出能量 570 kJ/mol ;②共价键,在特定的原子间由于共有电子而形成的吸引力,如两个碳原子间的共价键键能为 370 kJ/mol ;③金属键,由非局域电子(金属原子的最外层电子或价电子)而形成的吸引力。

分子可定义为一个牢固地结合在一起的原子团,但它与别的同样的原子团之间的结合是相当弱的,例如 F_2 ,破坏连接两个原子的共价键需要 160 kJ/mol 的能量,而使分子分离而沸腾气化只需 3 kJ/mol 的能量。分子间的结合力也称为次级键,包括范德华力(诱导力、色散力和取向力)、氢键、盐键、卤键等。氢键是次级键力中最强的(氢键的最大能量约 30 kJ/mol),而且较普遍。

材料的键合方式决定其性能。离子键没有方向性,离子键的结合力很强,所以由离子键结合而成的离子晶体有很高的强度、硬度、熔点;离子键材料的导电性很差(由于离子的运动不像电子那么容易)。共价键具有饱和性、方向性,共价键的结合力很强,所以共价键材料的强度、硬度、熔点很高,脆性大(由于共价键的方向性),绝缘性(由于其外层电子都用于成键)。金属键没有方向性,金属键的结合力比共价键弱,所以金属键材料的硬度、熔点都低于共价键材料,可产生较大变形(由于金属键没有方向性),导电性好(公有电子能自由运动)。氢键具有饱和性、方向性。范德华力很弱,所以分子键材料的硬度、熔点都很低。

实际凝聚态材料的键合情况往往不是单一的,如碳元素可以结合成金刚石(共价键),也可以结合成石墨(层内形成环状共价键,层间形成金属键和分子键)。两个成键原子的电负性相差很大时,形成的化合物主要是离子键;电负性相差较小时,主要形成共价键,也有一定的离子键;同种原子之间,可以是共价键,或金属键。

金属材料的结合键主要是金属键;无机非金属材料的结合键主要是共价键或离子键;高分子材料的结合键主要是共价键、分子键、氢键。

3. 材料的组成

对建筑材料组成的研究,通常分为化学组成、矿物组成。

化学组成指构成材料的基本元素和化合物。一般地,金属材料的化学组成以主要元素的含量来表示,无机非金属材料的化学组成以氧化物的含量来表示,高分子材料的化学组成

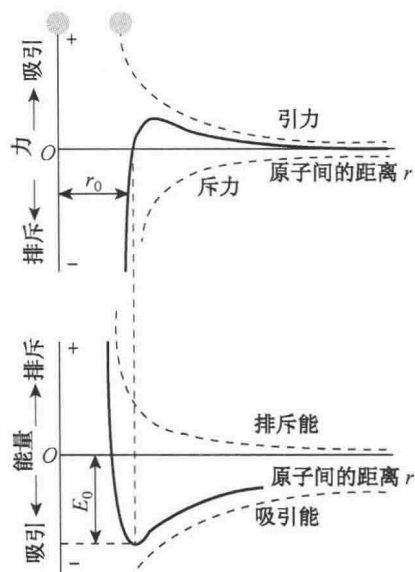


图 1-1 原子间作用力

以官能团来表示。

矿物组成指构成材料的矿物种类和数量。矿物是指无机非金属材料中,某些元素或化合物以特定的结合形式存在,并具有特定的物理化学性质的组织结构,例如硅酸盐矿物中的硅氧四面体。

在实际生产中,材料的组成以配方、成分表等形式表示。

【案例分析 1-2】 混凝土配合比设计。

有人说,混凝土配合比很简单,就是 1:2:3,即 1 份水泥、2 份黄沙、3 份石子,加水适量。这样说有一定道理,因为这样做出的混凝土用来垫一垫简易道路、修一修临时围墙还是可以的,但是在正式的建筑工程上是绝对不允许的,因为不能确定其强度值有多大,原因是水灰比不确定、水泥标号未知、砂石级配不明。混凝土配合比设计应参照 JGJ 55—2011《普通混凝土配合比设计规程》,在进行配合比设计之前,必须取得以下基本数据:①混凝土强度设计要求:混凝土强度等级。②混凝土耐久性要求:混凝土所处环境条件或要求的抗冻等级、抗渗等级。③原材料情况:水泥(品种、标号、密度、堆积密度)、砂石(品种、表观密度、堆积密度、吸水率、含水率、级配、砂的细度模数、石子的最大粒径)、拌合水(水质、水源)、外加剂(品种、名称、特性)。④施工条件及工程性质:搅拌及振捣方法、要求的流动性、施工单位水平、构件形状及尺寸、钢筋的疏密程度等。

设计正确的配合比,应同时满足以下几方面要求:混凝土拌合物具有良好的和易性;混凝土具有结构设计及施工进度所要求的强度;混凝土具有所要求的抗渗、抗冻等方面的耐久性;尽量节省水泥、合理使用材料、降低成本。实际上,采用相同的原材料,可以按要求设计出具有不同强度、流动性、耐久性的混凝土。

【案例分析 1-3】 偶联剂。

偶联剂是一类具有两个不同性质官能团的物质,其分子结构的最大特点是分子中含有化学性质不同的两个基团,一个是亲无机物的基团,易与无机物表面起化学反应;另一个是亲有机物的基团,能与合成树脂或其他聚合物发生化学反应,或生成氢键溶于其中。因此偶联剂被称作“分子桥”,用以改善无机物与有机物之间的界面作用,从而大大提高复合材料的性能,如力学性能、电性能、热性能、光性能等。

例如硅烷偶联剂是一类在分子中同时含有两种不同化学性质基团的有机硅化合物,其经典产物可用通式 YSiX_3 表示。式中,Y 为非水解基团,包括链烯基(主要为乙烯基),以及末端带有 Cl、 NH_2 、SH、环氧、 N_3 、(甲基)丙烯酰氧基、异氰酸酯基等官能团的烃基,即碳官能基;X 为可水解基团,包括 Cl、OMe、OEt、 $\text{OC}_2\text{H}_4\text{OCH}_3$ 、 OSiMe_3 、OAc 等。由于这一特殊结构,其分子中同时具有能和无机材料(如玻璃、硅砂、金属等)化学结合的反应基团及与有机材料(合成树脂等)化学结合的反应基团,可以用于表面处理、增黏剂。

1.1.2 材料的结构

一般从宏观、细观、微观三个层次研究材料的结构与性能之间关系。

1. 宏观结构

用肉眼可分辨的材料结构,其尺寸在 10^{-3} m 以上(毫米级)。