



普通高等教育规划教材
国家级精品课程教材

土木工程材料

TUMU GONGCHENG CAILIAO

主编 阎培渝 [清华大学]



人民交通出版社

China Communications Press



普通高等教育规划教材
国家级精品课程教材

土木工程材料

TUMU GONGCHENG CAILIAO

主编 阎培渝 [清华大学]



人民交通出版社
China Communications Press

内 容 提 要

本教材简要介绍了主要的土木工程材料的组成、结构、性能及它们的相互关系,土木工程材料的应用技术。本书还提供了学生实验指导书。本书以材料科学理论为基础,引入最新的研究成果,探讨材料的组成、结构与性能的关系,结合工程实际需要,介绍土木工程材料选用的原则。

本书可供非土木工程专业开设的土木工程材料课程选用,也可供一般应用型本、专科院校、成人和继续教育学院、自学考试土木工程专业开设的相关课程选用。

图书在版编目(CIP)数据

土木工程材料/阎培渝主编. —北京:人民交通出版社,2009.5

ISBN 978-7-114-07160-7

I. 土… II. 阎… III. 建筑材料—高等学校—教材

IV. TU5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 070418 号

书 名: 土木工程材料

著 作 者: 阎培渝

责任编辑: 王 霞(wx@ccpress.com.cn)

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010) 59757969, 59757973

总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 787×960 1/16

印 张: 14

字 数: 272 千

版 次: 2009年5月 第1版

印 次: 2009年5月 第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-07160-7

定 价: 26.00 元

(如有印刷、装订质量问题,由本社负责调换)

前言 QIAN YAN

土木工程材料是土木工程建设的物质基础,土木工程材料的进步推动结构设计和建筑施工工艺的进步,所以土木工程材料是土木工程专业主要的专业基础课之一。对于许多其他专业,如工程管理、工程力学、工程地质、交通工程、建筑学、环境工程、矿业工程等,也需要了解土木工程材料的基本知识和应用技术。由于这些专业的知识体系的特点,并受到学时数的限制,这些专业不需也不能像土木工程专业那样系统地学习土木工程材料。本书即针对这些少学时、对专业知识要求不高的专业编写。本书力图用浅显的语言解释建筑材料涉及的基础理论,着重介绍如何正确应用建筑材料。

中国是目前世界上经济最活跃的国家,正处于快速发展时期。大量的基础设施正在建设中,需要大量的建筑材料。中国的大宗结构工程材料的产量长期居世界首位,旺盛的需求促进了建筑材料行业的巨大发展。近年来建筑材料科学研究与工程应用都取得了长足的进步,出现了许多新材料、新工艺,对于常用传统建筑材料的认识也有所改变。本书力图反映这种变化。

本书重点突出三个特点,即:(1)强调建筑材料的生产和应用必须符合可持续发展的原则;(2)以材料科学理论为基础,探讨材料的组成、结构与性能的关系,结合工程实际需要,介绍建筑材料选用的原则;(3)力图引进最新的研究成果,向读者介绍建筑材料的发展动态,使读者了解建筑材料发展的趋势。书中涉及的材料性能、计算公式和试验方法等,均引用了最新的标准规范。

由于是第一次编写简明版的《土木工程材料》,对于内容的深度和广度的把握没有经验。并由于编写者水平的限制,书中难免存在一些错误,诚恳地希望广大读者和同行专家批评指正,提出宝贵意见,编写者不胜感谢。

清华大学土木工程系 阎培渝
2008年12月 于北京清华园

目录 MU LU

第一章 绪论	1
第一节 土木工程材料及其分类.....	1
第二节 土木工程材料的发展历程.....	2
第三节 土木工程材料的组成、结构与性能的关系	6
第四节 建筑材料基本性质.....	9
习题与思考题	19
第二章 水泥混凝土	20
第一节 水泥	22
第二节 辅助性胶凝材料(矿物掺合料)	44
第三节 化学外加剂	50
第四节 骨料	62
第五节 新拌混凝土的性质	73
第六节 硬化混凝土的力学性质	80
第七节 混凝土的变形性能	88
第八节 混凝土的耐久性能	94
第九节 混凝土的配合比设计与质量控制.....	105
第十节 高性能混凝土和高强混凝土.....	113
第十一节 其他品种混凝土.....	117
习题与思考题.....	131
第三章 砌体材料	133
第一节 砖.....	133
第二节 建筑砌块.....	137
第三节 轻质墙板.....	139
第四节 建筑砂浆.....	142
习题与思考题.....	145
第四章 金属材料	147
第一节 钢的生产、分类与结构	147

第二节 建筑钢材的技术性质·····	150
第三节 建筑钢材的选用·····	156
第四节 金属的腐蚀与防护·····	160
习题与思考题·····	162
第五章 高分子材料·····	163
第一节 沥青与沥青混合料·····	163
第二节 建筑用塑料·····	174
第三节 建筑涂料·····	179
第四节 建筑防水材料·····	183
习题与思考题·····	185
建筑材料试验·····	186
试验 I 建筑材料基本性质试验 ·····	186
试验 II 水泥试验·····	189
试验 III 混凝土用砂、石试验 ·····	196
试验 IV 混凝土拌合物性能试验 ·····	202
试验 V 混凝土力学性能试验 ·····	204
试验 VI 建筑砂浆试验 ·····	208
试验 VII 砌墙砖试验 ·····	211
试验 VIII 石油沥青试验 ·····	214
参考文献·····	218

第一章 绪 论

第一节 土木工程材料及其分类

土木工程材料是指用于土木工程建设的各种材料。土木工程材料种类繁多,应用广泛,即使是同一类材料,也有许多品种。在进行生产和施工管理,制定产品质量标准及试验方法,或进行材料性能研究过程中,通常按以下几种方法对土木工程材料进行分类。

一、按照制造方法分类

按照制造方法,土木工程材料可分为天然材料和人工材料。天然材料是指对自然界中的物质只进行简单的形状、尺寸、表面状态等物理加工,而不改变其内部组成和结构,例如天然石材、木材、土、砂等。人工材料是对自然界中取得的原料进行煅烧、冶炼、提纯、合成或复合等加工而得到的材料,例如钢材、铝合金、水泥、混凝土、砖瓦、玻璃、塑料、石油沥青、木材制品、合成纤维材料等。

二、按照化学组成分类

按照化学组成,土木工程材料可分为无机材料、有机材料和复合材料。无机材料又分为金属材料和非金属材料,用于土木工程的金属材料主要有建筑钢材、铝合金、不锈钢、铜、铸铁等,其中建筑钢材用量最大。非金属材料又称为矿物质材料,在土木工程材料中占据主要位置,包括天然石材、烧土制品、水泥、混凝土、建筑陶瓷、建筑玻璃等。有机材料包括天然的有机材料与合成的有机材料。木材、竹材、沥青、生漆、植物纤维等属于天然有机材料。合成有机材料有塑料、涂料、合成树脂、粘结剂、密封材料等。复合材料是指两种或两种以上材料复合而成的材料,例如钢筋混凝土、钢纤维混凝土是金属与非金属材料复合而成;聚合物混凝土、沥青混凝土、玻璃钢是有机材料与无机材料复合而成;木塑材料是天然材料与人工材料复合而成。复合材料具有更加优良的特性。

三、按照使用功能分类

按照使用功能,土木工程材料可分为承重材料、装饰装修材料、隔断材料、防火材料等。承重材料主要用作建筑物中的梁、柱、基础、承重墙体等承受荷载的构件,构成

结构物的骨架,通常使用的材料有木材、石材、钢材、混凝土等。装饰、装修材料用于建筑物的内外表面装饰,以分隔、美观、装饰及保护结构体为目的,主要有涂料、瓷砖、壁纸、玻璃、各类装饰板材、金属板、地毯等。隔断材料是指以防水、防潮、隔声、保温隔热等为目的的材料,包括各类防水材料、各种具有控制热量传递功能的玻璃、保温板材与砂浆、密封材料等。防火材料是以防止火灾的发生和蔓延为目的的材料,包括防火门、石棉水泥板、硅钙板、岩棉、混凝土预制构件等。

四、按照使用部位分类

按照使用部位,土木工程材料可分为基础材料、结构材料、屋顶材料、地面材料、墙体材料、顶棚材料等。

土木工程材料种类繁多,性能各异,其分类方法也有许多,根据分析问题的不同角度或者施工管理方便等可采取不同的分类方法。

第二节 土木工程材料的发展历程

在人类漫长的历史发展过程中,土木工程材料的发展经历了从无到有,从天然材料到人工材料,从手工业生产到工业化生产这样几个阶段(图 1-1)。

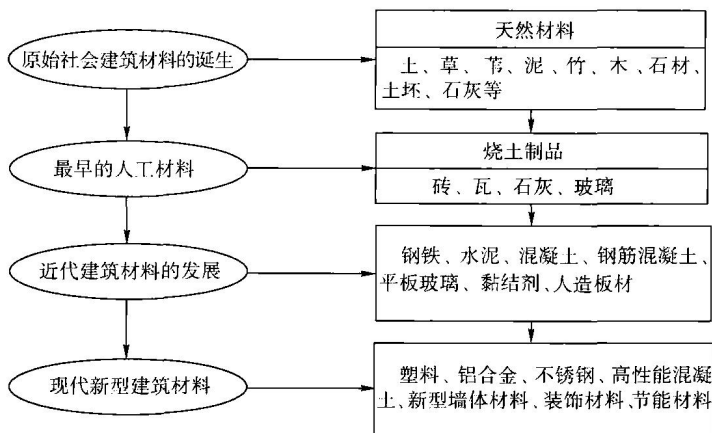


图 1-1 土木工程材料的发展历程

一、天然材料的利用

大约距今 10000~6000 年前,人类学会了建造自己的居所。这一时期的房屋多为半地穴式,所使用的材料为天然的木、竹、苇、草、泥等。墙体多为木骨抹泥,有的还

用火烤得极为坚实,屋顶多为茅草或草泥。除了住居之外,人们还建造了一些防卫用的壕堑、牲畜栏和储藏用的窖穴等生活设施。

天然石材具有比木材、泥、土等材料更坚硬、耐久的性质,但不易切割和使用。随着人类生产工具的进步,取材能力增强,人们开始利用天然石材建造房屋和纪念性结构物。最早利用大块石材的结构物当数公元前 2500 年前后建造的埃及金字塔。公元前 400~前 500 年建造的古希腊雅典卫城、公元 80~200 年期间兴旺一时的罗马古城,也大量使用了天然石材。进入中世纪,石材建筑更是风靡欧洲,许多皇家建筑及教堂,均采用石材作为结构材料。由于石材建筑坚固耐用,因此许多建筑物得以长久地保存下来,成为人类宝贵的文化遗产。

公元前 16~前 11 世纪(商代)的青铜器时代,由于青铜器的大量使用,使得社会生产力水平有了很大提高。同时,青铜器的使用为木结构建筑及“版筑技术”提供了很大的方便。所谓“版筑技术”,就是用木板或木棍作边框,然后在框内填筑黄土,用木杵夯实之后,将木板拆除。这是一种非常经济的筑墙方法,就地取土筑墙,木版框可以重复使用多次。利用这种技术,对天然土进行简单的加工,用于人类的住居及其他建筑物。在我国西北地区现在仍在使用这种技术建造房屋。碾压混凝土筑坝技术则是现代的版筑技术。

二、烧土制品——最早的人工建筑材料

以天然黏土类物质为原料,经过预先成型,然后高温焙烧获得的建筑材料叫做烧土制品。烧土制品是人类最早加工制作的人工建筑材料,可以说是与人类的文化、历史同步发展的一种土木工程材料。

土坯是黏土砖的前身,将黏土用水拌和成泥,能产生塑性变形。利用这种性质,将黏土泥放入一定尺寸的模型中成型,然后利用太阳光照干燥制成,这是人类最初加工制造的建筑材料,这种土坯最早在公元前 8000 年左右,就在中近东到埃及一带使用。在古埃及和美索不达米亚的遗迹中,有很多构筑物就使用了这种日晒土坯。土坯制作简单,成本低廉,保温性能好,直到现在,在一些干旱少雨、工业生产不发达的偏僻农村仍然使用土坯砌筑房屋的墙体或内墙。但是土坯组织粗糙,强度低,吸水后软化。为了克服这些缺点,人们将土坯在高温下焙烧,成为坚实、耐水的黏土砖。在土坯出现后大约 3000 年(即公元前 5000 年左右),就出现了烧制的黏土砖。这种黏土砖最早被苏美尔人用于建造宫殿。

我国从西周时期(大约公元前 1060~前 711 年)开始出现了黏土砖,到了秦汉时期,黏土砖已经作为最主要的房屋建筑材料被大量使用,因此有“秦砖汉瓦”之称。黏土砖是烧土制品的代表性材料,与土坯相比,黏土砖强度高、耐水性好,同时外形规则、尺寸适中,易于砌筑,2000 多年以来,黏土砖在我国房屋建筑中始终是墙体材料的主角。

但是烧制黏土砖要破坏大量的耕地,随着人口的增多,土地资源的匮乏,我国正在逐步限制实心黏土砖的使用和生产,这种传统的墙体材料将逐步被其他材料所取代。

石灰是最早的人工胶凝材料。生石灰的化学成分主要是 CaO ,是由天然的石灰石(CaCO_3)经煅烧分解而成的。石灰加水拌和成浆体,具有流动性和可塑性,经过一定时间,水分蒸发形成氢氧化钙结晶,同时与空气中的二氧化碳反应生成碳酸钙而产生强度,同时能把块状材料或散粒材料粘结起来。在西周时期的陕西凤雏遗址中,发现土坯墙上采用了三合土(即石灰、黄沙、黏土混合)抹面,说明我国在 3000 多年前已能烧制石灰。

玻璃也属于烧土制品的一种,其主要成分是硅酸盐。它是将高温下的熔融体快速冷却,固化形成的非晶态物质。玻璃最大的特点是具有透明性,强度高、坚硬,抗压强度大约为 $600\sim 1200\text{MPa}$,是石材的 $10\sim 20$ 倍。玻璃最早是作为装饰品或祭祀品使用,公元前 2000 年左右的埃及古墓中就已经有了透明的玻璃祭葬品。到中世纪左右,在欧洲玻璃的应用范围扩展到建筑和美术品。最开始在建筑上的应用是将彩色玻璃用于教堂建筑的内墙壁画,例如,公元 1100 年左右俄国圣索菲亚教堂的内墙就采用了彩色玻璃。而用于门窗采光的透明玻璃,是 1640 年首先在俄国生产的。如今,透明的平板玻璃已成为建筑上不可缺少的采光材料,同时,各种功能的玻璃制品也广泛地应用在建筑物上。

烧土制品的出现,使人类建造房屋的能力和水平跃上了新的台阶,土坯、黏土砖作为块体材料用来砌筑墙体,其强度和保温隔热性能远远优于木骨抹泥的墙体,黏土瓦作为屋面材料大大提高了房屋的防雨、防渗漏功能,使居室环境得到改善。以石灰为胶凝材料可以拌制成砂浆,既可以用于块体材料之间的胶结,提高砌筑墙体的强度和整体性,又可以用于墙体的抹面,提高墙体的隔断性能和表面美观性。玻璃作为具有透光、透明性材料,用于房屋建筑的门窗,大大提高了居室的采光效果。因此,烧土制品作为最早的人工建筑材料,使人类的居住环境得到了根本性的改善。

三、近代土木工程材料的进步与建设水平的提高

1824 年,英国人 Joseph Aspdin 将石灰石与黏土混合制成料浆,然后在石灰窑中高温煅烧,得到固体材料,将其粉磨成粉末,成为水泥,并取得了发明专利。这种水泥硬化之后,与当时英国的波特兰(Portland)岛出产的一种淡黄色石材的颜色极为相似,所以将这种水泥命名为波特兰水泥(Portland cement)。波特兰水泥的主要矿物成分是硅酸盐矿物,所以在我国称之为硅酸盐水泥。波特兰水泥的发明是建筑材料发展史上的一个里程碑。与石灰胶凝材料相比,硅酸盐水泥不仅强度高,而且具有水硬性,与砂、石和水拌和制成混凝土材料,广泛地用于房屋建筑、道路、桥梁、水工结构物等基础设施的建设,使人类的建设活动范围和规模得到进一步发展。

世界各国很快认识到了水泥的优良性能,先后开始水泥的生产,并大量用于各项建设活动。我国于1889年最早在河北唐山建立了第一家水泥厂,当时叫做“启新洋灰公司”,正式开始生产水泥。如今我国已经是世界上水泥产量最高、使用量最多的国家。

钢材在使用过程中容易生锈;混凝土则属于脆性材料,虽然抗压强度较高,但抗拉强度极低,很容易开裂。在实际使用中,人们发现两者结合起来具有很好的黏结力,可以互相弥补缺点,发挥各自所长,在混凝土中放入钢筋,既可以使钢筋免于大气中有害介质的侵蚀,防止生锈;同时钢筋提高了构件的抗拉性能,于是出现了钢筋混凝土材料。1855年,法国的J. L. Lambot在第一届巴黎万国博览会上展示了钢筋混凝土小船,宣告钢筋混凝土制品问世。1887年,M. Koenen发表了钢筋混凝土梁的荷载计算方法。1892年法国的Hennebique发表了梁的剪切增强配筋方法。这些计算及设计方法成为今天钢筋混凝土结构设计的基础。

进入20世纪以来,钢筋混凝土材料有了两次较大的飞跃。其一是1908年,由C. R. Steiner提出了预应力钢筋混凝土的概念,1928年法国的E. Fregssinet使用高拉力钢筋和高强度混凝土使预应力混凝土结构实用化。其二是1934年,在美国发明了减水剂,在普通的混凝土中加入少量的减水剂,可大大改善混凝土的工作性。这些发展使混凝土和钢筋混凝土的性能得到进一步提高,应用范围进一步扩大。

水泥混凝土、钢筋混凝土及预应力钢筋混凝土的出现,是土木工程材料发展史上的又一飞跃。它使建筑物向高层、大跨度发展有了可能。混凝土材料无论是强度还是耐久性,都远远优于木材、砖、瓦等传统材料。今天钢筋混凝土材料已经成为建设工程中使用量最大的人造材料。

四、现代各种新型材料使建筑物形式更加丰富

如果说19世纪钢材和混凝土作为结构材料的出现使建筑物的规模产生了飞跃性的发展,那么20世纪出现的高分子有机材料、新型金属材料和各种复合材料,则使建筑物的功能和外观发生了根本性的变革。以塑料和合成树脂为代表的高分子有机材料是20世纪具有代表性的新型材料。品种繁多的有机建筑材料作为装饰装修材料、防水材料、保温隔热材料、管线材料、绝缘材料,在建筑物中发挥着各种功能作用,使建筑物的使用功能和质量得到了很大提高。

铝合金、不锈钢等新型金属材料是现代建筑理想的门窗及住宅设备材料,这些新型的金属材料在建筑物开口部位及厨房、卫浴设备上的应用,极大地改善了建筑物的密封性、美观性与清洁性,提高了居住质量。

20世纪建筑材料的另一个明显的进步是各种复合材料的出现和使用,包括有机材料与无机材料的复合、金属材料与非金属材料的复合,以及同类材料之间的复合。

例如含有钢纤维、玻璃纤维、有机纤维等的各种纤维增强混凝土,利用纤维材料抗拉强度高的特点及它们与混凝土的黏结性,提高了混凝土的抗拉强度和冲击韧性,克服了混凝土材料脆性大、容易开裂的缺点,使混凝土的使用范围得到扩大;采用聚合物混凝土、树脂混凝土等复合材料制造的各种地面材料、台面材料,模仿天然石材的质地和花纹,而且比石材韧性好、颜色美观;采用小木块、碎木屑、刨花等木质材料为基材,使用胶黏剂或夹层材料加工而成的各种人造板材,模仿天然木材的纹理和走向,可达到以假乱真的程度。这些板材用作建筑物的地面、内隔墙板、护墙板、顶棚板、门面板及各种家具等,弥补了天然木材尺寸有限、材质不均匀、容易变形等方面的缺陷,提高了木材的利用率和功能。除此之外,石膏板、矿棉吸声板等各种无机板材,可代替天然木材作内墙隔板、吊顶材料,使建筑物的保温性、隔声性等功能更加完善。各种空心砖、加气混凝土砌块等墙体材料代替实心黏土砖,可节约土地资源。随着高效减水剂的开发成功,高性能混凝土应运而生,使混凝土材料又迈上一个新的台阶。各种涂料、防水卷材、嵌缝密封材料的开发利用,改善了建筑物的防水性和密闭性。各种壁纸用于建筑物的内墙装修,极大改善了建筑物的美观性、舒适性。各种陶瓷制品用于地面、墙面、卫生洁具,耐酸、碱、盐等化学物质的侵蚀,容易清洁,使人们生活更加方便、舒适,生活质量得到了极大提高。

随着人类社会的发展水平的提高,人类对于自然界的索取和破坏程度加剧。为了实现人类社会的可持续发展,需要按照循环经济的理念来指导土木工程材料的生产 and 消费。即合理利用资源 and 环境容量,在物质循环利用的基础上发展经济。“3R 原理(Reduce——减量化、Reuse——再利用、Recycling——再循环)”是循环经济的核心内容。土木工程材料工业可以大量利用工业固体废弃物,减少资源消耗。提高土木工程材料的耐久性,延长建筑物的使用寿命,也是减少资源消耗的有效途径。

第三节 土木工程材料的组成、结构与性能的关系

影响材料性质的因素很多,这些因素可以分成两部分,即外界因素和材料本身的内部因素,而后者更重要。一般从材料的组成和结构出发,分析材料性质与其内在因素的关系。

一、材料组成

土木工程材料的组成通常是指其化学成分和矿物组成。

化学成分是指材料的化学元素及化合物的种类和含量。

矿物是指地质作用中各种化学成分所形成的自然单质和化合物,具有相对固定的化学成分和内部结构。矿物是组成地壳的基本物质单元。土木工程材料中引申了

这一概念。通常将人造的无机非金属材料中具有特定晶体结构和特定物理力学性能,且与天然矿物相似的组织称为矿物。矿物组成即指材料中的矿物种类及含量。

材料的组成及其相对含量的变化,不仅影响其化学性质,也会影响材料的物理力学性质。例如一般建筑钢材容易发生锈蚀,当冶炼时加入铬和镍就可以提高钢材的防锈能力,成为不锈钢。又如硅酸盐水泥主要由4种矿物成分(水泥熟料矿物)加入适量石膏混合磨细而得,如果不掺加石膏,则这种水泥会因快凝而无法在工程中使用。再如在混凝土搅拌过程中加入化学外加剂,混凝土性能即可发生明显改变。

材料成分不同,其物理力学性质也会有明显差异。典型的例子如金属材料和高分子材料,它们在导电性能方面有明显差异。纯铁、钢、生铁三者的主要成分都是铁元素,但纯铁强度相对较低且较柔软,钢却较坚韧,生铁则硬脆。形成这种差别的主要原因之一就是含碳量的不同,含碳量不同也会引起物质结构的变化。材料中某些成分的改变,可能会导致某项性质的较大改变,而对另一些性质虽然也有影响,但却不明显。不锈钢中的铬、镍元素可明显提高钢的防锈性能,但对钢的强度的影响却不大。

由上述可见,材料的组成直接影响材料性能,在材料的生产、使用时应根据对性能的要求来确定材料组成及所占比例。

二、材料的结构

材料的结构是决定材料物理力学性能的重要因素。材料的结构是指在 $10^{-10} \sim 10^{-3} \text{m}$ 尺寸范围内的组织状态,可分为微观结构和细观结构。

1. 微观结构

微观结构是原子、分子层次的结构状态,尺寸范围 $10^{-10} \sim 10^{-6} \text{m}$,通过电子显微镜、X射线衍射等检测手段进行观察、分析和研究。固体无机材料的微观结构分为晶体、玻璃体和胶体3种。

晶体结构是质点(离子、原子或分子)按特定的规则排列并呈周期性重复的空间结构。晶体具有规则的几何外形、固定的熔点、各向异性、化学稳定性好等特点。多晶体材料是由许多小晶粒杂乱排列形成的,材料的性质不仅与各个单一晶粒的性质有关,还受到细观层次的晶体组织结构(不同单晶粒间的组合)的影响。宏观层次多晶体材料的各向同性是众多小晶粒无规则排列的表现。

晶体分为原子晶体、离子晶体、分子晶体、金属晶体。质点间的相互作用力与化学键有关,一般是共价键(形成原子晶体)最大,离子键次之,分子键最小,金属键的结合力则视电子数目而定,电子愈多,结合力愈大。钢材中晶格的质点密集程度很高,质点间有金属键联结,这使得钢材具有很大的塑性变形能力、较高的强度,并且具有良好的导热性和导电性。如果晶格中质点的密集程度不高,则材料的变形能力就很

小,其脆性很大,如天然石料等。

晶体材料中并不完全是以单一化学键联结质点,在复杂晶体结构中其化学键的结合也相当复杂。在建筑材料中占有重要地位的硅酸盐材料,其结构就是以共价键和离子键交互构成的,由硅氧四面体单元与不同的金属离子结合而成。在石棉材料中硅氧四面体形成链状结构,纤维与纤维之间的键力要比链状结构方向上的共价键弱。云母中硅氧四面体单元连成片状结构,再叠合成层状结构,层与层之间以分子键结合。而在石英中硅氧四面体以立体网状结构形状结合,所以强度和硬度都较高。

在熔融物冷却凝固过程中,如果冷却速度较快,质点来不及按一定规则排列,便形成玻璃体。玻璃体材料各向同性,破坏时没有解理面,无固定熔点。玻璃体在急冷过程中,质点间的能量以内能的形式存储起来,使得玻璃体具有化学不稳定性,有时表现出一定的化学活性。如火山灰材料中非晶态 SiO_2 与石灰在有水的条件下可发生反应生成水化硅酸钙,而石英砂中的晶态 SiO_2 与石灰在常温下几乎不反应。在建筑材料中常利用粒化高炉矿渣、烧黏土和某些天然岩石具有化学活性的特点,将其作为水泥混合材或混凝土的掺合料。

胶体结构是由一种细小的固体粒子(直径 $1\sim 100\text{nm}$)分散在介质中形成的。由于胶体的质点很小,其总的表面积很大,因而表面能很高,吸附能力也很强。在胶体结构中,当固体粒子(胶粒)较少时,形成溶胶结构,具有一定的流动性和黏滞性;当胶粒较多时,形成凝胶结构,具有固体性质。在长期应力作用下,凝胶体又有黏性流动的性质。

玻璃体和胶体材料一般均为非晶体材料。非晶体材料的体态和性质的变化范围较大,从性质方面看,既可以是具有很大变形能力的溶胶,如沥青等,也可以是变形能力很小的脆性固体,如玻璃等。一般来说,非晶体材料在外力作用下可同时产生可恢复的弹性变形和不可恢复的塑性变形。非晶体材料还包括有机高分子聚合物材料,它们由链状或网状的高分子聚合而成,其弹性变形可超过 100% 。

材料在微观结构上的差异影响到材料的强度、硬度、熔点、变形、导热性等性质。材料的微观结构决定着材料的物理力学性质。

2. 细观结构

细观结构是从材料内部组织和相的层次来研究材料的,其尺寸范围为 $10^{-6}\sim 10^{-3}\text{m}$ 。借助光学显微镜就可观察材料的细观结构。

土木工程材料的细观结构研究应根据具体材料分类进行。钢材的晶体组织在常温下有铁素体、珠光体、渗碳体,当它们在钢中的含量不同时,钢材的力学性能就会有明显差别。木材的微观组织即管胞、导管、木纤维、髓线、树脂道的分布及管状细胞的组成决定了木材的性能。其他土木工程材料,如混凝土、天然岩石的性能也受到细观层次上的组织(相)特征、分布情况、组织(相)间界面的影响。

三、材料的构造

材料构造是指宏观的组织状态和具有特定性质的材料单元的组合情况,其尺寸范围在 10^{-3}m 以上。材料内部孔隙对强度的影响,最明显之处就是减小了材料承受荷载的有效面积。更深入的研究表明,应力在孔隙处的分布会发生变化,最简单的例子是在孔隙处的应力集中(重分布)。孔隙不仅影响材料的力学性质还影响材料的物理性质,如导热性、水渗透性、抗冻性等。孔隙对材料性质的影响不仅取决于孔隙率,还与孔隙大小、形状、分布等特征有着密切关系。

按孔隙特征可将材料分为致密结构(如钢铁等)、多孔结构(如泡沫塑料等)和微孔结构(如石膏等)。

由材料单元组合而成的材料性能取决于各单元的性质、组合方式、所占比例等因素。按组合方式可将材料分为堆聚结构(如水泥混凝土等),纤维结构(如木材、纤维增强塑料等),层状结构(如胶合板等),散粒结构(如膨胀珍珠岩等)。

综上所述,材料的组成、结构与构造决定材料的性质。材料组成、结构与构造的变化带来了材料世界的千变万化。

第四节 建筑材料基本性质

一、基本物理性质

1. 密度(ρ)、表观密度(ρ_0)与堆积密度(ρ_1)

(1)密度是指材料在绝对密实状态下单位体积的质量,用式(1-1)表示:

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

式中: ρ ——材料的密度, g/cm^3 ;

m ——材料在绝对干燥状态下的质量, g ;

V ——材料在绝对密实状态下的体积, cm^3 。

(2)表观密度是指材料在自然状态下单位体积的质量,用式(1-2)表示:

$$\rho_0 = \frac{m}{V_0} \quad (1-2)$$

式中: ρ_0 ——材料的表观密度, kg/m^3 ;

m ——材料的质量, kg , 需要注明含水状态, 如果没有特殊注明, 一般指气干状态下的质量;

V_0 ——材料在自然状态下的体积, m^3 , 该体积包括材料内部封闭孔隙的体积。

(3)堆积密度(也叫体积密度)指粒状材料在堆积状态下单位体积的质量,用式(1-3)表示。根据堆积的密集程度,又可分为紧密体积密度和松散体积密度。材料的堆积密度为:

$$\rho_1 = \frac{m}{V_1} \quad (1-3)$$

式中: ρ_1 ——材料的堆积密度, kg/m^3 ;

m ——材料在自然状态下的质量, kg ;

V_1 ——材料在堆积状态下的体积, m^3 , 该体积既包括材料内部封闭孔隙的体积, 也包括颗粒之间的空隙体积。

材料的密度、表观密度是材料最基本的物理性质, 它间接地反映材料的密实、坚硬程度。同时在生产和施工过程中, 通过密度、表观密度或堆积密度等指标来掌握材料的质量、体积等数据, 以便安排储存场地、运输工具等。

2. 密实度(D)与孔隙率(P)

(1)密实度(D)指材料体积内被固体物质充实的程度, 即材料的绝对密实体积 V 占外观体积 V_0 的百分比, 用式(1-4)表示:

$$D = \frac{V}{V_0} \times 100\% \quad (1-4)$$

如果已知材料在绝对干燥状态下的表观密度 ρ_0 , 则密实度也可以表示为式(1-5):

$$D = \frac{\rho_0}{\rho} \times 100\% \quad (1-5)$$

(2)孔隙率(P)指材料体积内孔隙体积所占的比例, 即材料内部的孔隙体积占外观体积的百分率, 用式(1-6)表示:

$$P = \frac{V_0 - V}{V_0} \times 100\% = \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right) \times 100\% \quad (1-6)$$

根据上述密实度和孔隙率的定义, 可得出密实度和孔隙率的关系: $D + P = 1$ 。

孔隙率或密实度反映材料的结构致密程度, 直接影响材料的力学性能、热学性能及耐久性等性能。但是孔隙率只能反映材料内部所有孔隙的总量, 并不能反映孔径分布状况, 也不能反映孔隙是开放的, 还是封闭的, 是连通的, 还是孤立的等特性。不同尺寸、不同特征的孔隙对材料性能的影响程度不同, 例如封闭孔隙有利于提高材料的保温隔热性, 在一定范围内对材料的抗冻性也有利; 而开放或连通的孔隙则降低材料的保温性和抗渗性。孔径较大的孔隙对材料的强度极为不利, 但孔径在 20nm 以下的凝胶孔对强度几乎没有任何影响。所以, 除孔隙率之外, 孔径大小、孔隙特征对材料的性能也具有重要的影响。

按照孔径大小可将材料内部的孔隙分为气孔(或大孔)、毛细孔和凝胶孔3种。其中气孔的平均孔径范围为 $50\sim 200\mu\text{m}^*$,最大甚至达到 1mm 以上;毛细孔的孔径范围为 $2.0\text{nm}\sim 50\mu\text{m}$,对材料的吸水性、干缩性和抗冻性影响较大;凝胶孔极其微小,孔径在 20nm 以下。按照孔隙是否封闭特征,又分为连通孔隙(开口孔隙)和封闭孔隙(闭口孔隙),连通孔隙和封闭孔隙体积之和等于材料的总孔隙。

3. 填充率(D_1)与空隙率(ρ_1)

填充率及空隙率适用于粒状材料。

(1)所谓填充率是指粒状材料在堆积体积中,被颗粒填充的程度,可以用颗粒的外观体积 V_0 占堆积体积 V_1 的百分率来表示,如式(1-7)所示:

$$D_1 = \frac{V_0}{V_1} \times 100\% \quad (1-7)$$

如果采用相同含水状态下的表观密度 ρ_1 和堆积密度 ρ_0 ,则填充率也可以表示为式(1-8):

$$D_1 = \frac{\rho_1}{\rho_0} \times 100\% \quad (1-8)$$

(2)所谓空隙率是指粒状材料在堆积体积中,颗粒之间空隙体积占堆积体积的百分率,可以用式(1-9)表示:

$$P_1 = \frac{V_1 - V_0}{V_1} \times 100\% = \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_0}\right) \times 100\% \quad (1-9)$$

根据上述定义,可得出填充率和空隙率的关系: $D_1 + P_1 = 1$ 。

空隙率反映粒状材料堆积体积内颗粒之间的相互填充状态,是衡量砂、石子等粒状材料颗粒级配好坏,进行混凝土配比设计的重要原材料数据。在进行混凝土配比设计时,通常根据骨料的堆积密度、空隙率等指标计算水泥浆用量及砂率等。

二、材料与水有关的性质

1. 亲水性与憎水性

将一滴水珠滴在不同的固体材料表面,水滴将出现不同状态,如图1-2所示。其中图1-2a)所示为水滴向固体表面扩展,这种现象叫做固体能够被水润湿,该材料是亲水性的;图1-2b)所示为水滴呈球状,不容易扩散,这种现象叫做固体不能被水润湿,该材料是憎水性的。

* $1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$; $1\mu\text{m}=10^{-6}\text{m}$