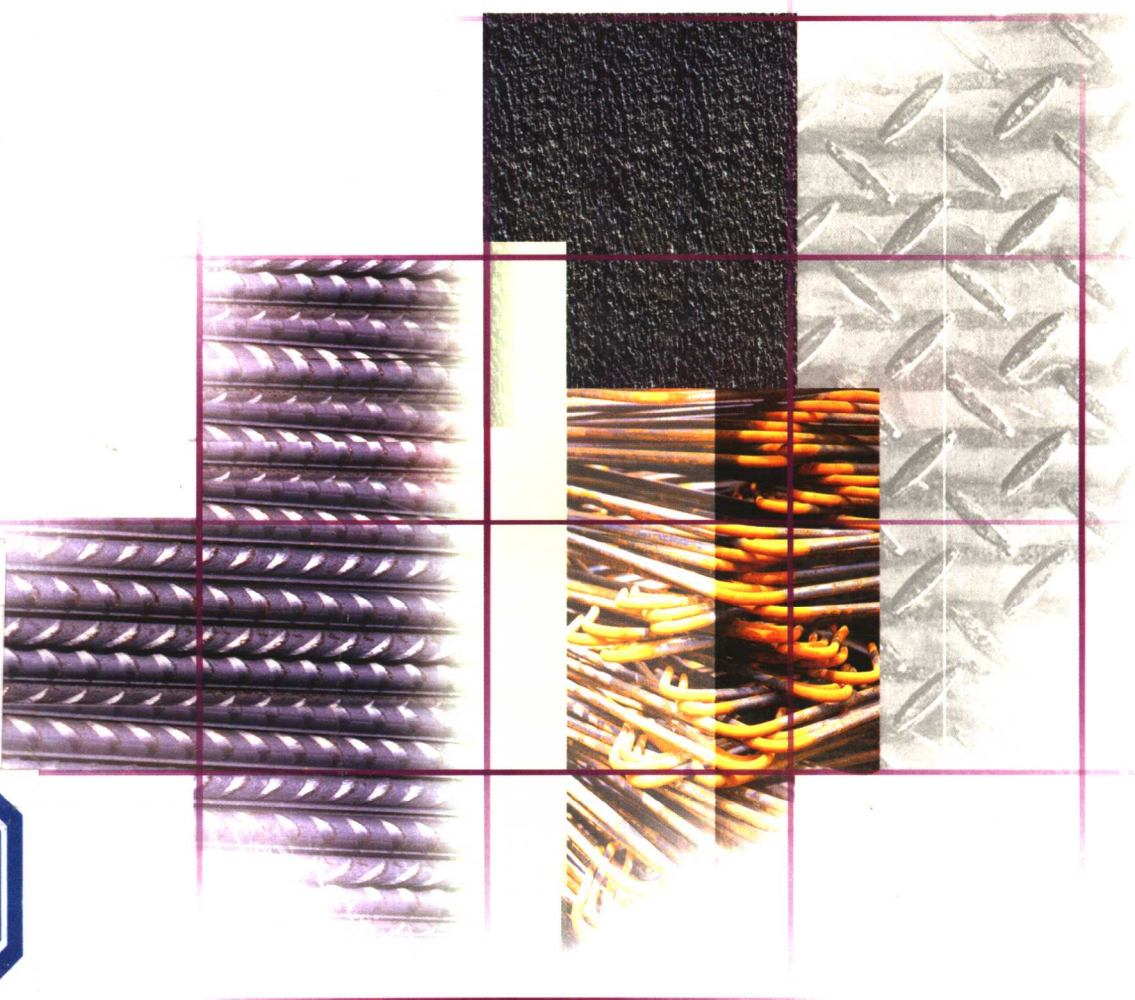


高等学校教材

土木工程材料

TUMU GONGCHENG CAILIAO

中南大学 周士琼 主编



中国铁道出版社

TU5-43
Z15

高等学校教材

土木工程材料

中南大学 周士琼 主编
西南交通大学 凤凌云 主审

中国铁道出版社

2005年·北京

内 容 简 介

本教材是为适应土木工程本科专业拓宽专业口径而编写的,属于铁道工程、桥梁工程、房屋建筑、公路与城市道路、隧道与地下建筑、矿山建筑等课群组的专业基础课程(习惯上又称技术基础课)教材。本书主要介绍土木工程中常用材料的基本组成、结构、技术性能、质量检验和合理选材等方面的基本理论和基本知识。全书共分九章,包括土木工程材料基本性质、无机胶凝材料、混凝土、建筑砂浆、钢材和铝合金、木材、建筑高分子材料、沥青及沥青基材料(包括沥青混合料等)、其他材料(包括墙体材料、绝热及吸声材料、装饰材料、天然石材)等。

本书也可供有关科研、生产、施工人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

土木工程材料/周士琼主编. —北京:中国铁道出版社,2004.8

高等学校教材

ISBN 7-113-06069-2

I. 土… II. 周… III. 土木工程材料-高等学校-教材 IV. TU5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 072630 号

书 名:土木工程材料

作 者:周士琼 主编

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)

责任编辑:李丽娟

封面设计:薛小卉

印 刷:遵化市胶印厂印刷

开 本:787×1092 1/16 印张:19.75 字数:496 千

版 本:2004 年 8 月第 1 版 2005 年 2 月第 2 次印刷

印 数:3001~7000 册

书 号:ISBN7-113-06069-2/TU·782

定 价:27.50 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

编辑部电话(010)51873135

发行部电话(010)63545969

前 言

本教材是为适应土木工程本科专业拓宽专业口径而编写的,属于铁道工程、桥梁工程、房屋建筑、公路与城市道路、隧道与地下建筑、矿山建筑等课群组的专业基础课程(习惯上又称技术基础课)教材。通过对本课程的学习为学生提供土木工程材料的基本理论、基本知识和试验技能,也为今后从事土木工程技术工作,就材料选择、检验、质量控制、验收、改性与科学研究等方面奠定必要的基础,并为各种材料的结构设计和施工等后续课程提供基本知识。

本书根据高等学校土木工程专业指导委员会编制的《土木工程材料》教学大纲要求编写,主要介绍土木工程材料的基本性质、无机胶凝材料、混凝土、建筑砂浆、钢材与铝合金、建筑高分子材料、沥青及沥青基材料(包括沥青混合物等)、木材、其他材料(包括墙体材料、绝热与吸声材料、装饰材料、天然石材)等。

本书由中南大学周士琼主编,西南交通大学凤凌云主审。参加编写工作的有:中南大学周士琼(绪论、第三章第一节),中南大学胡晓波(第一、四章),北京交通大学朋改非(第二章),中南大学谢友均(第三章第二节、第六章),西南交通大学李固华(第五章),中南大学邓德华(第七章、第九章),西南交通大学叶跃忠(第八章)。

编者力求本书突出重点,理论联系实际,反映土木工程材料领域的新材料、新技术。在编写过程中,得到编者所在院校及中国铁道出版社和同仁们的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢。书中不当之处,希望读者批评指正。

编 者

2004年5月

目 录

绪 论	1
第一章 土木工程材料的基本性质	4
第一节 材料的组成、结构、构造与性质的关系	4
第二节 材料的物理性质	7
第三节 材料的力学性质	12
第四节 材料的耐久性、装饰性和安全性	18
复习思考题	19
第二章 无机胶凝材料	21
第一节 石 膏	21
第二节 石 灰	24
第三节 水 玻 璃	28
第四节 镁氧水泥	29
第五节 硅酸盐水泥	30
第六节 掺混合材的硅酸盐水泥	43
第七节 其他品种水泥	48
复习思考题	53
第三章 混 凝 土	55
第一节 普通混凝土	55
第二节 其他混凝土	100
复习思考题	116
第四章 建筑砂浆	120
第一节 砂浆的组成材料	120
第二节 砌筑砂浆	122
第三节 抹面砂浆	126
第四节 商品砂浆与特种砂浆	128
复习思考题	129
第五章 钢材与铝合金	130
第一节 钢的生产、分类与晶体组织	130
第二节 钢材的技术性质	136
第三节 化学成分、热处理、冷加工硬化与时效对钢性质的影响	141
第四节 建筑钢材的标准与选用	144
第五节 建筑钢材的锈蚀与防止	156
第六节 铝及铝合金	157

复习思考题	160
第六章 木材	161
第一节 木材的分类及构造	161
第二节 木材的性质	163
第三节 木材的防护处理	168
第四节 材料的综合利用	169
复习思考题	170
第七章 建筑高分子材料	172
第一节 概 述	172
第二节 塑 料	179
第三节 橡 胶	186
第四节 高分子防水材料	188
第五节 胶 粘 剂	195
复习思考题	199
第八章 沥青及沥青基材料	201
第一节 石油沥青与煤沥青	201
第二节 防水卷材	207
第三节 沥青基防水涂料	209
第四节 沥青基建筑密封材料	212
第五节 沥青混合物	214
第六节 沥青马蹄脂碎石(SMA)混合物	232
复习思考题	233
第九章 其他材料	234
第一节 墙体材料	234
第二节 绝热、吸声材料	244
第三节 天然石料	250
第四节 装饰材料	255
复习思考题	266
土木工程材料试验	268
试验一 土木工程材料基本性质试验	268
试验二 水泥试验	273
试验三 混凝土试验	279
试验四 砂浆试验	296
试验五 建筑钢材试验	299
试验六 石油沥青试验	303
试验七 沥青混合物马歇尔稳定度试验	306
试验八 烧结多孔砖试验	309
参考文献	310

绪 论

用于土木工程中的材料和材料制品统称为土木工程材料,包括砖、石、石灰、石膏、水泥、砂浆、混凝土、钢材、木材、沥青、沥青混合料、绝热材料、吸声材料、装饰材料等。土木工程材料是土木工程的物质基础,也是人类生活和生产的物质基础。材料是人类进步的里程碑,人类社会的发展伴随着材料的发明和发展,经历了石器时代、青铜器时代、铁器时代等。而今人类已跨入了人工合成材料的新时代。

材料科学是研究材料的内部结构、成分、构造对材料性能的影响及其相互关系的一门新兴的多学科互相交叉、相互渗透的科学。它随材料研究对象的空间尺度不同而划分为三个层次:空间尺度约在 1nm 量级为原子、电子微观层次;尺度约在 $1\mu\text{m}$ 量级为连续模型层次,这时材料被看成连续介质,不考虑其中单个原子、分子的行为;尺度对应于宏观材料为宏观层次,涉及大块材料的加工和使用性能。材料科学为材料的改性、性能变化提供理论依据,最终的目标是进行材料设计。所谓材料设计是指通过理论计算预报新材料的组分、结构与性能,或者说,通过设计来“订做”具有特定性能的新材料,显然这是人们所追求的长远目标。土木工程材料是材料科学的一个分支,侧重于在宏观尺度上,从工程应用的角度去研究材料的原材料、生产、成分及组成、结构和构造以及所处环境条件等对材料性能的影响及其相互关系的一门应用科学。土木工程材料用于铁道工程、桥梁工程、房屋建筑、公路与城市道路、隧道与地下建筑、矿山建筑等。

土木工程材料种类繁多,可按不同方式对材料进行分类。

按化学成分可将材料分为无机材料、有机材料与复合材料,如表 0-1 所示。

表 0-1 土木工程材料按化学成分分类

土木工程材料	无机材料	金属材料	黑色金属——钢、铁 有色金属——铝及铝合金、铜及铜合金等
		非金属材料	天然石材——石灰岩、大理岩、花岗岩等 玻璃和烧土制品——砖、瓦、陶瓷等 无机胶凝材料及其制品——石膏、石灰、镁氧水泥、水玻璃、水泥、混凝土、砂浆、硅酸盐制品等
	有机材料	植物材料	木材、竹材及其制品
		高分子材料	塑料、涂料、胶粘剂、合成橡胶、合成纤维等
		沥青材料	石油沥青、煤沥青
	复合材料	金属与非金属	钢筋混凝土、钢丝网水泥、钢纤维混凝土等
		有机与无机	聚合物混凝土、沥青混凝土、玻璃钢等

按材料在建筑物中的功能可分为承重材料、防水材料、隔热保温材料、吸声隔音材料、装饰材料与防护材料等。

按材料的用途可分为结构材料、墙体材料、屋面材料、地面材料、装饰材料与吊顶材料等。

新材料的问世导致了设计与施工的技术革命,而工程新技术的发展又促进了新材料的开发生产。因此土木工程材料的发展与土木工程技术的发展是相互制约,相辅相成,相互促进的。在原始社会,人类只能等待大自然的恩赐,利用泥土、砂石和树木等天然材料修建简单的房屋和桥梁。后来又懂得了用黏土烧制砖、瓦,用岩石烧制石灰和石膏,从此诞生了人造材料,我国举世闻名的万里长城、河北的赵州桥、古埃及的金字塔相继建成。约在公元初期人们应用石灰—火山灰水硬性胶凝材料,建成了罗马圣庙及罗马“庞贝”城等著名建筑。1824年英国J. Aspdin获得了人工配料生产波特兰水泥的专利,混凝土随之问世,并首先大规模应用于泰晤士河隧道工程。19世纪中叶发明了工业化炼钢技术,钢结构的问世,使结构物跨度从砖、石和木结构的几十米增加到百米以上;同时也出现了混凝土与钢筋复合的钢筋混凝土结构。1895年到1900年间,法国建成了第一批钢筋混凝土桥梁和人行道。20世纪初人工合成高分子材料问世,美国高分子材料年产量的体积已是钢的两倍,所以有人认为现在是高分子材料时代。20世纪以来,随着科学技术的不断发展,各种高科技的新型材料不断涌现。1928年法国E. Freyssinet获得预应力钢筋混凝土的专利,这是一个具有突破性进展的发明,预应力钢筋混凝土结构不仅可以提高混凝土的抗裂性,还能减轻结构自重,因而可用于大跨度结构、高层建筑、抗震等技术要求较高的工程。当代高强预应力钢筋混凝土结构甚至可取代钢结构。随着品种多样的水泥和新型混凝土、新型钢材以及混凝土外加剂的问世,为大跨度结构,特别是大跨桥梁、水工、海港、道路、高层建筑等工程提供了较理想的工程材料。与此同时,在工业与民用建筑方面,绝热、吸声、隔声、耐磨、装饰、防辐射等功能材料也应运而生。土木工程材料正朝着高性能、多功能、复合型的生态材料发展。所谓生态材料,研究的是与生态环境友好的土木工程材料。它追求的不仅是优异的使用性能,而且要求从材料设计、制造、使用、废弃直至再生的整个生命周期中必须具备与生态环境的协调性及人居环境的舒适性。

材料工业是典型的资源、能源消耗型工业,在其快速发展的同时,面临着资源、能源的过度消耗和环境的严重污染,材料工业将难以为继。因此我国材料工业应尽可能按循环经济的发展理念指导材料的产品生产与消费。即按生态规律来组织生产、消费和废物处理,合理利用资源和环境容量,在物质不断循环利用的基础上发展经济。“3R原理(Reduce—减量化、Reuse—再使用、Recycling—再循环)”是循环经济的核心内容。材料工业发展循环经济已有了不少成功的尝试,例如水泥行业从能源和资源两方面着手成为利废大户。通过技术进步,努力提高混凝土的性能,延长其使用寿命,是减少混凝土废弃,减少资源消耗的途径之一。高性能混凝土的研究已经显示出提高水泥混凝土耐久性、延长使用寿命的潜力。而开发直接有益于生态环境的生态混凝土,更为混凝土产业的发展提出了新的思路。在墙体材料工业中可大量消纳和利用工业废渣和农业废弃物,替代天然资源制造环保利废型墙体材料,如粉煤灰砖、煤矸石砖、建筑用纸面草板等。建筑垃圾的处理和废弃混凝土的再生利用方面,已向实用化迈出了可喜的一步。

目前我国绝大多数的土木工程材料都制定了相应的技术标准,包括产品规格、分类、技术要求、检验方法、验收规则、标志、运输、储存及使用说明等内容。土木工程材料生产厂家必须按照标准生产并实现质量控制;土木工程材料使用部门则按照标准选用、设计、施工,并按标准对材料的质量与性能进行检验与验收。因此材料的技术标准是供需双方对产品质量验收的依据,是保证工程质量的先决条件,也是使产品与国际接轨的重要手段。标准的表示方法由标准名称、部门代号、标准编号、批准年份四部分组成,其中部门代号统一规定如下:国家标准(GB)、建筑工程国家标准(GBJ)、建设部行业标准(JGJ)、建筑工业行业标准(JG)、国家建材局

标准(JC)、冶金部标准(YB)、铁道部标准(TB)、化工部标准(HG)、林业部标准(LY)、国家级专业标准(ZB)、中国工程建设标准化协会标准(CECS)、地方标准(DB)、企业标准(Q)等。国家标准、行业标准和地方标准按照要求执行的程度分为强制标准和推荐标准,若为推荐标准则以(/T)表示。各国都有自己的国家标准,一些主要发达国家的国家标准代号为:美国材料试验标准(ASTM)、英国国家标准(BS)、德国国家标准(DIN)、日本工业标准(JIS)、国际标准(ISO)等。了解并熟悉土木工程材料的技术标准,对掌握材料性能与质量,合理选用材料是十分必要的。标准是根据一定时期的技术水平制订的,随着科学技术的发展与使用要求的提高,需要不断进行修订,因此要随时注意新修订标准的出现。

土木工程材料品种繁多,性能各异。在土木工程总造价中,各种材料费用约占 50%~60%。土木工程材料的质量,直接影响到工程质量。因此,如何选用工程材料,对保证工程结构物的适用性、耐久性和经济性具有重要意义。

在培养土木工程专业人员的教学计划中,“土木工程材料”是一门技术基础课。它的任务主要是为土木工程结构设计和施工等专业课程提供土木工程材料方面的理论知识;同时,也为学生今后从事专业技术工作,就材料选择、材料验收、质量鉴定、材料试验、储存运输、防腐处理以及试验研究等方面,打下必要的基础。

本课程着重讲述土木工程中常用的几类主要工程材料。在学习过程中,应以材料的技术性质、应用范围和质量检验方法为重点,但也应注意了解材料成分、结构、构造和生产加工过程对其性能的影响,注意各种性能间的有机联系;同时还必须重视试验课的学习,通过试验课,结合实际观察,加深和巩固理论知识,学习试验操作技能和检验材料品质的方法,对试验结果做出正确分析和结论。土木工程材料的品种多样,必须注意分析和比较同类材料不同品种的共性和特性,以及异类材料之间的显著异同点,以利于在选择材料时,能针对实际条件,做出明确的抉择。

第一章

土木工程材料的基本性质

各类建筑物是由土木工程材料构筑而成的。其他工业、交通、能源等行业的基础设施如铁路、公路、港口、水利、电力、冶金、矿山等也主要是由土木工程材料组成的。由于各个建筑物或工业、交通、能源等基础设施的作用、功能不同,对材料性能的要求也不同,就是在同一工程中,由于结构部位不同,对所用材料性能的要求也会有差异。例如,有的材料主要是承受荷载的,有的则起围护、装饰、防腐、防水、防火、保温隔热以及其他特殊作用。目前,经济建设的迅速发展和工程技术的不断进步对材料提出了多功能的要求,也就是性能上既要有所侧重,又要多方面兼顾。作为工程设计、施工的技术人员,应该具备土木工程材料的基本知识,尤其在新材料不断出现的今天,学习材料学的一些基本知识就显得更加重要了。只有熟悉和掌握各种土木工程材料技术性质的特点,才能合理选用材料,使工程达到安全、适用、耐久和经济的目的。

本章选择土木工程材料中一些带有共性的性质进行讨论,如物理性质、力学性质、耐久性等等,并引入材料的组成、结构、构造与其性质的关系的一些基本概念。

第一节 材料的组成、结构、构造与性质的关系

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。因材料之间的差别很大,人们的认识方法也各有不同,所以我们将三个方面即从材料的组成、结构、构造来分析材料性质与其本身内在因素的关系。

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。

矿物的概念源自于地质学。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元素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四种矿物成分(水泥熟料矿物)加入适量石膏混合磨细生产而得,如果生产中没有掺加石膏,则这种水泥会因快凝而无法在工程中使用。再如在混凝土搅拌中加入外加剂后,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。在力学性质方面以纯铁、钢、生铁为例,三者的主要成分都是铁元素,但纯铁强度相对不高且较柔软,钢却较坚韧,生铁则硬脆。形成这种差别的主要原

因之一就是含碳量不同,从而引起组织结构的变化。

还应值得注意的是材料中某些成分的改变,可能会对某项性质引起较大的改变,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,但对钢的强度影响却不是很大。

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确定材料组成及所占比例。

二、材料结构

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

(一) 微观结构

微观结构是原子、分子和超细固体粒子层次的结构状态,尺寸范围 $10^{-10} \sim 10^{-6}$ m,通过电子显微镜、X 射线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、玻璃体和胶体三种。

1. 晶体结构

晶体结构是质点(离子、原子或分子)按特定的规则排列而呈周期重复的空间结构。可分为单晶体和多晶体(微晶体)材料。

单晶体具有规则的几何外形、固定的熔点,各向异性,化学稳定性较好等特点。晶体中的滑移面影响晶体材料的力学性质。多晶体材料是由许多小晶粒杂乱排列形成的,没有规则的外形,且各向同性。多晶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(即微小单晶体与其他质点的组合,或不同单晶粒间的组合)的影响。宏观层次上多晶材料各向同性是众多小晶粒和多晶组织结构的表现。

晶体中质点的本身特征、排布规律及质点间的相互作用力决定晶体材料的力学性质。根据质点的性质,晶体分为原子晶体、离子晶体、分子晶体、金属晶体。晶体中质点的排布规律决定了晶体结构,也决定晶体内质点的密集程度和滑移面。一般密集程度高,滑移面多,材料塑性好。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。钢材晶体中的质点的密集程度很高,质点间由金属键联结着,这使得钢材具有很大的塑性变形能力,并且具有良好的导热性和导电性。一定数目的自由电子也使得钢材有较高的强度。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,即使质点间以共价键联结,其脆性也很突出,如天然石料等。

晶体材料中并不完全是以单一键联结质点的,在复杂晶体结构中其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,其结构就是以共价键和离子键交互构成的,由 SiO_4 四面体单元与不同的金属离子结合而成。在石棉材料中 SiO_4 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。云母中的 SiO_4 单元连接成片状结构,再叠合成层状结构。层与层之间以分子键结合。而在石英中 SiO_4 四面体则以立体网状结构形状结合,所以强度和硬度都很高。

2. 玻璃体结构

玻璃体结构中质点的排列无周期性。玻璃体材料无固定几何外形,各向同性,破坏时没有解理面,无固定熔点。

玻璃体是由于熔融物冷却速度较快而形成的。在凝固过程中,质点来不及按一定规则排列,便形成固体。

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泼性。如常温下火山灰成分中的 SiO_2 与石灰在有水的条件下发生反应生成水化硅酸钙,而石英砂中的 SiO_2 与石灰几乎不反应。前者是玻璃态,而后者结晶较好。在土木工程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,将其作为水泥混合料或混凝土的掺合料。

3. 胶体结构

胶体结构是由细小的固体粒子(粒径 $1 \sim 100 \text{ nm}$)分散在液相或气相介质中所组成的结构。由于胶体中固体粒子很小,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)很少时,形成溶胶结构,具有一定的流动性和粘滞性;当胶粒较多时,形成凝胶结构,具有固体性质。在外力长期作用下,凝胶体又有粘性液体流动的性质。

玻璃体和胶体结构材料同为非晶体材料。非晶体材料的体态和性质的变化范围较大,从性质方面看,既可是具有很大变形能力的溶胶结构材料,如沥青等,也可是变形能力很小的脆性固体材料,如玻璃等。一般来说,非晶体材料在外力作用下同时产生可恢复的弹性变形和不可恢复的塑性变形。在非晶体材料中还值得一提的是有机高聚物材料,它们由链状或网状的高分子聚合而成。在力学性质方面与另外两类非晶体材料(玻璃体、胶体)相比,其突出特点是弹性变形有的可超过 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。可以说材料的微观结构决定着材料的物理力学性质。

(二) 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,其尺寸范围在 $10^{-6} \sim 10^{-3} \text{ m}$ 。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是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、树脂道的分布情况和管状细胞的组成,它们决定了木材的性能。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(或相)特征、分布情况、组织间界面的影响。

三、材料构造

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。材料构造的研究,就是研究材料孔隙和相同或不同材料单元间的搭配对材料性能的影响。不同材料适当搭配所形成的复合材料,其综合性能优于各个单一材料。因而,复合材料是近几十年材料研究应用领域十分关注的问题,关于复合材料的研究已成为一门新兴的学科。

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)和散粒结构(如膨胀珍珠岩等)。

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

第二节 材料的物理性质

一、与质量有关的性质

(一) 密度(ρ)

密度是指材料在密实状态下单位体积的质量。按下式计算:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{g/cm}^3)$$

式中 m ——材料的质量, g;

V ——材料在密实状态下的体积, cm^3 。

绝对密实状态下材料的体积是指不包括孔隙在内的体积。实际上对于什么样尺寸的空间属于材料的孔隙,还没有确切的定义。通常认为,钢材、玻璃等材料是密实的,内部没有孔隙。而大多数土木工程材料内部都有孔隙。确定材料密实体积的常用方法是:将材料磨细成粒径小于 0.25 mm 的粉末,再用排液法测出体积。用此法获得的密度又称“真密度”。当然理论上材料磨得愈细,所测密实体积愈精确。

某些散粒材料比较密实,其内部仅含少量微小、封闭的孔隙(如砂石等),从工程使用角度来说,不须磨细也可用排液法测出其近似的密实体积,相应得到的密度称为“视密度”。

(二) 表观密度(ρ_0)

表观密度是指材料在自然状态下单位体积的质量。按下式计算:

$$\rho_0 = \frac{m'}{V_0} \quad (\text{kg/m}^3)$$

式中 m' ——自然状态下材料的质量(包括材料质量和所含水的质量), kg;

V_0 ——材料在自然状态下的体积, m^3 。

材料的自然状态体积包括材料的密实体积和孔隙体积。对于外形规则的块体材料,测其外观尺寸就可得到自然体积,如立方体等。对外形不规则的块体材料,最常用的方法是将其加工成规则的块体,然后测其外观尺寸,或者采用蜡封排液法。

材料有孔隙,在自然状态下就可能含水,随含水量的变化,材料的质量和体积均会发生变化,此时材料的质量包括材料本身的质量和所含水分的质量。因而测定材料的表观密度时须注明含水情况。通常所说的表观密度是指干燥状态下的表观密度。另外,值得注意的是公路交通部门将颗粒材料的密实体积、内部封闭孔隙体积与吸水饱和面干时所含水的体积之和称为毛体积,相应的材料质量与毛体积之比称为毛体积密度。

(三) 堆积密度(ρ'_0)

堆积密度是指散粒材料在堆积状态下单位体积的质量。按下式计算:

$$\rho'_0 = \frac{m'}{V'_0} \quad (\text{kg/m}^3)$$

式中 m' ——自然状态下材料的质量(包括材料质量和所含水的质量), kg;

V'_0 ——材料的堆积体积, m^3 。

散粒材料的堆积体积,除包括材料的密实体积外,还包括了材料内部的孔隙体积和外部颗粒间的空隙体积。测量方法一般是将自然状态下的散粒材料装满一定容积的容器中,容器的体积即为散粒材料的堆积体积。

表 1-1 列举了几种常用土木工程材料的密度(视密度)、表观密度、堆积密度。

表 1-1 几种常用土木工程材料的密度、表观密度及堆积密度

材 料	密度(视密度)/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	表观密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	堆积密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
石灰岩	2.60	1 800~2 600	—
砂	2.60	—	1 400~1 700
钢、铸钢	7.85	7 850	—
铝	2.80	2 800	—
水泥	3.10	—	1 200~1 300
普通混凝土	—	1 950~2 500	—
沥青混合料	—	2 300	—
水泥砂浆	—	2 100~2 200	—
木材	1.55	400~800	—
泡沫塑料	—	20~50	—

(四) 孔隙率与密实度 空隙率与填充率

1. 孔隙率(P)与密实度(D)

材料中的孔隙体积与总体积的百分比称为孔隙率,按下式计算:

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

材料体积中被固体物质充实的程度,称为密实度,按下式计算:

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

即

$$P + D = 1$$

材料密实度愈大,则强度愈高,吸水率愈小,导热性愈大。土木工程材料中孔隙特征对性能影响也很显著,往往要区分开口孔隙率和闭口孔隙率。开口孔隙率对材料的耐久性、保温性、隔音性、吸声性能等的影响很大。

2. 空隙率(P')与填充率(D')

散粒材料颗粒间的空隙体积与堆积总体积的比例称为空隙率,按下式计算:

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

类似于密实度,散粒材料堆积体积中被颗粒体积填充的程度称为填充率,按下式计算:

$$D' = \frac{V_0}{V_0'} = \frac{\rho_0'}{\rho_0} \times 100\%$$

同样

$$P' + D' = 1$$

填充率(空隙率)大小反映了散粒材料的填充程度,在涉及混凝土和所用砂石的一些计算中填充率(空隙率)也很重要。

二、与水有关的性质

地下、水中甚至地面的许多工程设施常会与水或大气中的水汽接触。为防止结构物或建筑物受到水介质的侵蚀,必须了解土木工程材料与水有关的性质。

(一)材料的亲水性与憎水性

材料的表面或与其他介质接触的界面上都存在表面能(界面能),表现为表面张力,而且两者在数值上相等。虽然不同材料的表面能大小不同,然而都力图使表面能最小,处于能量稳定的状态。

在材料与水接触的情况下,新形成界面上的表面能小于材料与原介质(空气)接触面的表面能时,水就被材料吸附。

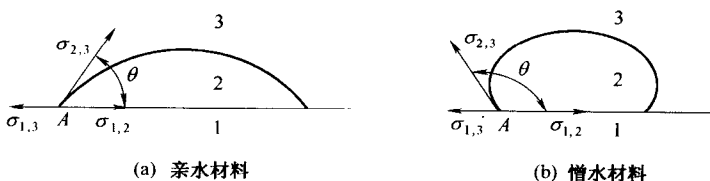


图 1-1 材料的亲水性和憎水性

图 1-1 中的 A 点表示材料、水和空气的三相交点。这个交点上有三种力起作用:材料与水的表面张力($\sigma_{1,2}$)、材料与空气间的表面张力($\sigma_{1,3}$)、水与空气的表面张力($\sigma_{2,3}$)。当三力在水平方向上平衡时可得下式:

$$\sigma_{1,3} - \sigma_{1,2} - \sigma_{2,3} \cos \theta = 0$$

则

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{1,3} - \sigma_{1,2}}{\sigma_{2,3}}$$

上式中 θ 角称为湿润角。当 θ 为零时,材料完全被水湿润;当 $0 < \theta \leq 90^\circ$ 时,材料表面可湿润,如图 1-1(a) 所示, $\sigma_{1,2}$ 小于 $\sigma_{1,3}$, 水被材料吸附,材料就被称为亲水性材料; $90^\circ < \theta \leq 180^\circ$ 时,材料表面不可湿润,如图 1-1(b) 所示, $\sigma_{1,2}$ 大于 $\sigma_{1,3}$, 材料被称为憎水性材料。土木工程材料中的木材、混凝土、砂、石等为亲水性材料;沥青、石蜡等为憎水性材料。

(二)吸水性和吸湿性

1. 吸水性

材料与水接触时其毛细管会吸收水分,这种性质称为吸水性。

材料的吸水性主要取决于材料的亲水性、孔隙率和孔隙特征。水碰到憎水性材料时,会成水滴而流掉,不能润湿材料表面。亲水性材料的开口大孔,水虽易进入但难以充满。封闭分散的孔隙,水则无法进入。当孔隙率大,且孔隙多为开口、细小、连通时,材料吸水就多。

材料吸水后,对材料性能会产生一系列的影响,如体积膨胀、表观密度增加、强度降低、导热性能增大、耐久性降低等。

2. 吸湿性

材料在潮湿空气中吸收水分的性质为吸湿性。

憎水性材料从空气中吸收水分较难,亲水材料则较容易从空气中吸收水分。当亲水材料具有很多开口的毛细孔时,则吸湿性更大。吸湿作用一般呈可逆性,吸湿量会随空气湿度、温度的变化而发生变化。

3. 含水率、吸水率、平衡含水率

(1) 含水率

材料所含水的质量与干燥状态下材料的质量之比称为含水率。按下式计算:

$$w = \frac{m'_1 - m}{m} \times 100\%$$

式中 m ——材料在干燥状态下的质量, g;

m'_1 ——材料在含水状态下的质量, g。

(2) 吸水率

材料含水(吸水)达到饱和面干时的含水率,称为吸水率。吸水率有两种表示方法:

$$\text{质量吸水率} \quad \beta = \frac{m'_2 - m}{m} \times 100\%$$

$$\text{体积吸水率} \quad \beta' = \frac{m'_2 - m}{V_0} \times \frac{1}{\rho_{H_2O}} \times 100\% = \frac{m'_2 - m}{V_0} \times 100\%$$

式中 m ——材料在干燥状态下的质量, g;

m'_2 ——材料吸水饱和面干时的质量, g;

V_0 ——材料在自然状态下的体积, cm^3 ;

ρ_{H_2O} ——水的密度,一般取 1 g/cm^3 ,即 1000 kg/m^3 。

如果将以上两式相除,则 β 与 β' 的关系为:

$$\beta' = \beta \cdot \frac{\rho_0}{\rho_{H_2O}} = \beta \rho_0$$

普通黏土砖的质量吸水率可达 20%,有的木材可达 100% 以上,而花岗岩却仅有 0.7%,普通混凝土为 2%~3%。吸水率对特定的材料是定值,它的大小从一个侧面反映了材料的亲水性、开口孔隙率和孔隙特征。

(3) 平衡含水率

材料在一定温度下吸湿,与空气湿度达到平衡时,其含水率称为平衡含水率。平衡含水率表示材料的吸湿情况。木材的吸湿性较大,因而干燥和潮湿天气下木材平衡含水率差别较大,影响木材的外观尺寸及其他力学性质。许多墙体材料也是多孔材料,吸湿后的平衡含水率随外界条件变化较大,材料的其他性能也因此而发生变化。

(三) 耐水性

材料抵抗水破坏作用的能力称为耐水性,即材料经水浸泡后,不发生破坏,同时强度也不显著降低的性质。材料的耐水性用软化系数(K_P)表示:

$$K_P = \frac{f_{\text{饱}}}{f_{\text{干}}}$$

式中 $f_{\text{饱}}$ ——材料在吸水饱和状态下的抗压强度, MPa;

$f_{\text{干}}$ ——材料在干燥状态下的抗压强度, MPa。

K_P 值的变化范围为 0~1。 K_P 值愈小,说明材料吸水后强度降低愈多,耐水性也愈差。

有时软化系数的大小是选择材料的主要依据。一般位于水中或潮湿环境中的重要结构物,其所用主要结构材料的软化系数应不小于 0.85~0.95;次要结构或受湿较轻的结构物,要求材料的软化系数不得小于 0.75~0.85。

从广义角度上看,材料耐水性是材料抵抗水对其力学性质、光学性质、装饰性等诸方面劣化作用的抵抗能力。

(四)抗渗性

材料抵抗压力水或液体渗透的性质称为抗渗性。材料抗渗性的大小与材料的孔隙率和孔隙特征有密切关系。水从材料内部渗透的过程,不同于材料毛细管的自然吸水现象。材料的孔隙率大且孔隙尺寸大,并连通开口时,材料具有较高的渗透性;如果孔隙率小,孔隙封闭不连通,则材料不易被水渗透。

材料的抗渗性用渗透系数(K)表示。渗透系数按下式计算:

$$K = \frac{Q}{F \cdot t} \cdot \frac{d}{H} \quad (\text{cm/h})$$

式中 Q ——透水量, cm^3 ;

d ——试件厚度, cm ;

F ——透水面积, cm^2 ;

t ——时间, h ;

H ——静水压力水头, cm 。

渗透系数愈小,材料的抗渗性愈好。有的材料如混凝土则用抗渗等级表示抗渗性大小,其值是根据标准试件不透水时所能承受的最大水压力表示的。抗渗等级愈高,抗渗性能愈好。

(五)抗冻性

抗冻性是指材料在吸水饱和状态下,能经受多次冻融循环作用而不被破坏,强度也不严重降低的性质。

冰冻对材料的破坏作用是由于材料孔隙内的水结冰时体积膨胀(约增大 9%)所引起的。材料内部开口孔隙在充满水的情况下发生多次冻融,材料就会出现剥落和明显的裂缝。另外,材料内部孔隙中的水结冰时产生冰水蒸气压,使尚未成冰的水发生迁移而产生渗透压力,该压应力高于材料本身的承受能力时,材料也就发生冻害。当然若材料强度足够大或者水在孔隙内不易充满,则材料的抗冻性能就好。

工程上常用抗冻等级来表示材料的抗冻性。该等级的划分取决于材料在一定条件下经受冻融而不被破坏的次数。当然,抗冻等级愈高抗冻性愈好。

三、与热有关的性质

(一)热传导性和导热系数

导热是传热的三种方式之一。当材料两面存在温度差时,热量会从温度较高的一面传导到温度较低的一面,这种性质称为热传导性(导热性)。其大小用导热系数(λ)来表示,在稳定传热的条件下, λ 值可通过试验按下式计算:

$$\lambda = \frac{Q \cdot D}{\Delta t \cdot Z \cdot A} \quad [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$$

式中 Q ——通过材料传递的热量, J ;

D ——材料厚度, m ;