



“十二五”江苏省高等学校重点教材

土木工程材料

CIVIL ENGINEERING MATERIALS

主 编 蒋林华



科学出版社



“十二五”江苏省高等学校重点教材

土木工程材料

主 编 蒋林华

副主编 张 研

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书根据土木工程专业的培养要求,特别是结合大土木水利的发展特点,兼顾土木和水利两方面的需求,在多年工程材料课程讲授及其试验的基础上编写而成。本书的指导思想是在学生知识学习的基础上,进一步提升学生的思考能力、分析能力、创新能力,增强综合素质。

本书系统论述了土木水利工程(包括建筑工程、道路工程等)中常用的各种工程材料的成分、生产过程、技术性质、性能分析及合理运用等内容,其中特别强调了理实一体化的教学特点。本书共分十三章,包括:绪论,土木工程材料的基本性质,天然石材,胶凝材料,混凝土,砂浆,墙体材料与屋面材料,金属材料,木材,高分子材料,沥青及沥青混合料,功能材料,无机结合料稳定材料和土木工程材料试验。

本书可作为高等工科院校土木、水利、交通、材料、采矿类专业本科生、研究生的教学用书,也可供有关专业的研究人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

土木工程材料 / 蒋林华主编. —北京:科学出版社,2014

(“十二五”江苏省高等学校重点教材)

ISBN 978-7-03-039535-1

I. ①土… II. ①蒋… III. ①土木工程-建筑材料-高等学校-教材
IV. ①TU5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 006723 号

责任编辑:童安齐 / 责任校对:刘玉靖

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

铭浩彩色印装有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 2 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2014 年 2 月第一次印刷 印张:26 1/2

字数:612 000

定价:45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换) < 骏杰 >

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62137154

版权所有,侵权必究

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

前 言

进入 21 世纪,我国高等教育肩负着科教兴国和培养新世纪人才的历史重任,要求高等学校培养“宽口径、厚基础、高素质、富有创新力”的专业人才。为适应我国高等教育专业设置调整以及 21 世纪对“大土木”类专业本科生的新要求,一些高等院校对土木、水利、交通等专业或按大类招生、或按“大土木”专业培养、或设立平台课程,使学生毕业后能服务于“大土木”工程领域。

河海大学是以水利、土木为特色的高等学校,水利水电工程、土木工程、港口航道与海岸工程、农业水利工程、水务工程、设施农业科学与工程、交通工程、工程力学、地质工程、给水排水工程、工程管理等“大土木”类专业齐全,《土木工程材料》是土木水利类专业的平台课程之一。

土木工程材料是建造房屋、道路、港口、大坝、桥梁、隧道、机场等工程所用的材料,是这些工程建设的重要物质基础。《土木工程材料》(有的为《建筑材料》)是高等院校“大土木”类专业的一门重要学科基础课。已有的一些教材大多分专业编写,如土建类的《土木工程材料》、《建筑材料》,水利类的《建筑材料》等,难以满足新的“大土木”类专业的培养目标和教学要求。因此,目前急需编写能“全面兼顾”“大土木”专业的《土木工程材料》通用教材。

本书为江苏省“十二五”高等学校重点教材和河海大学“十二五”规划教材,是为配合教学改革,满足平台课程教学需要而编写的。编写时力求兼顾土木水利类各专业的需要,反映近年来我国土木工程材料科研、生产及工程应用的新成果,体现河海大学土木水利类专业齐全和长期形成的特色和优势。

本书为高等学校水利水电工程、土木工程、港口航道与海岸工程、农业水利工程、交通工程等专业的教材和教学用书,也可作为工程技术人员的参考书。

全书由河海大学蒋林华教授担任主编,张研副教授担任副主编。具体编写分工为:蒋林华(前言、绪论、第四章),张研(第一章、第十章)、储洪强(第二章、第五章)、张凤臣(第三章、第八章)、徐怡(第六章)、江少群(第七章)、申明霞(第九章)、刘小艳(第十一章)、李中华(第十二章)、贾艳涛(第十三章)。

在编写过程中,我们学习和参考了已出版的有关土木工程材料(建筑材料)方面的许多专著、教材和规范标准。这些文献的丰富内容和美观、实用的编排格式,曾给编者以很大的启发,本书的部分图表借鉴了其中的一些成果,在此,谨向原作者表示深切的谢意。

由于编者水平有限,疏漏和不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2013 年 9 月

目 录

前言

绪论	1
第一节 土木工程材料的定义与分类	1
第二节 土木工程材料在工程建设中的重要性	2
第三节 土木工程材料的历史和发展	2
第四节 土木工程材料的技术标准	3
第五节 土木工程材料的学习要求	4
第一章 土木工程材料的基本性质	5
第一节 材料的物理性质	5
第二节 材料的力学性质	13
第三节 材料的耐久性与环境协调性	19
第四节 材料的组成、结构与性能的关系	20
复习思考题	25
第二章 天然石材	26
第一节 岩石的形成与分类	26
第二节 天然石材的主要技术性质	27
第三节 常用天然石材	29
复习思考题	31
第三章 胶凝材料	32
第一节 气硬性胶凝材料	32
第二节 通用硅酸盐水泥	43
第三节 特种水泥	60
第四节 新型水泥	65
复习思考题	67
第四章 混凝土	69
第一节 概述	69
第二节 普通水泥混凝土	72
第三节 专用混凝土	126
第四节 新型混凝土	136
复习思考题	151
第五章 砂浆	153
第一节 砂浆的组成材料	153
第二节 砂浆的主要技术性质	155
第三节 砂浆配合比设计	157

第四节 特种砂浆	161
复习思考题	163
第六章 墙体材料与屋面材料	164
第一节 砖	164
第二节 砌块	177
第三节 墙板	181
第四节 屋面材料	185
复习思考题	186
第七章 金属材料	187
第一节 基本知识	187
第二节 建筑钢材	194
第三节 铝及铝合金	221
第四节 其他金属材料	224
复习思考题	224
第八章 木材	225
第一节 木材的构造	225
第二节 木材的物理和力学性质	227
第三节 木材的主要产品	231
第四节 木材的腐蚀与防护	233
复习思考题	234
第九章 高分子材料	235
第一节 基本知识	235
第二节 塑料	239
第三节 橡胶	243
第四节 纤维	246
第五节 胶粘剂	249
第六节 涂料	256
第七节 土工合成材料	263
第八节 化学灌浆材料	269
复习思考题	276
第十章 沥青及沥青混合料	277
第一节 概述	277
第二节 沥青	278
第三节 沥青混合料	299
复习思考题	315
第十一章 功能材料	317
第一节 防水材料	317
第二节 绝热材料	326
第三节 吸声材料	330

第四节 装饰材料	336
复习思考题	347
第十二章 无机结合料稳定材料	348
第一节 概述	348
第二节 无机结合料稳定材料的技术性质	349
第三节 无机结合料稳定材料的组成设计	354
第四节 土壤固化剂	359
复习思考题	361
第十三章 土木工程材料试验	362
第一节 概述	362
第二节 基本性质试验	367
第三节 石材试验	371
第四节 水泥试验	373
第五节 混凝土集料试验	379
第六节 混凝土矿物外加剂试验	386
第七节 混凝土试验	388
第八节 砂浆试验	391
第九节 砌墙砖与砌块试验	394
第十节 钢筋试验	397
第十一节 木材试验	399
第十二节 土工合成材料试验	401
第十三节 石油沥青试验	404
第十四节 沥青混合料试验	407
第十五节 绝热材料试验防护热板法测定绝热材料的传热性质试验	409
主要参考文献	412

绪 论

第一节 土木工程材料的定义与分类

一、土木工程材料的定义

土木工程材料是指建造土木工程(泛指建筑、水利、水运、道路、桥梁等建设工程)所使用的各种材料及制品,如水泥、混凝土、砖、瓦、玻璃、瓷砖、钢材、木材、塑料等。

二、土木工程材料的分类

土木工程材料品种繁多,性能、功用各异,为便于掌握各种材料的性能和应用,常按来源、化学成分、功能、使用部位等进行分类。

(一) 按来源分类

- (1) 天然材料,取自于自然界,不经或经过加工的材料,如砂、石等。
- (2) 人造材料,又称合成材料,是人为地将不同物质经化学方法或聚合作用加工而成的材料,其特质与原料不同,如塑料、玻璃、钢铁等。

(二) 按化学成分分类

- 1. 无机材料
 - (1) 金属材料,可分为黑色金属(钢、铁、不锈钢等)和有色金属(铝、铜等及其合金)两大类。
 - (2) 非金属材料,常用的有天然石材(砂、石及石材制品等)、烧土制品(砖、瓦、玻璃等)、胶凝材料(石灰、石膏、水泥、水玻璃等)、混凝土及硅酸盐制品(混凝土、砂浆、硅酸盐制品)等。
- 2. 有机材料
 - (1) 植物材料,如木材、竹材等。
 - (2) 沥青材料,如石油沥青、煤沥青、沥青制品等。
 - (3) 高分子材料,如塑料、涂料、胶粘剂、合成橡胶等。
- 3. 复合材料
 - (1) 无机非金属材料与有机材料复合,如玻璃钢、聚合物混凝土、沥青混合料等。
 - (2) 金属材料与无机非金属材料复合,如钢纤维混凝土等。
 - (3) 金属材料与有机材料复合,如轻质金属夹芯板等。

(三) 按在建筑物或构筑物中的功能分类

- (1) 承重材料,用于承重结构承受荷载的材料。
- (2) 保温隔热材料,又称绝热材料,是指对热流具有显著阻抗性的材料。

(3) 吸声隔声材料,其中吸声材料是具有较强的吸收声能、减低噪声性能的材料;隔声材料是指把空气中传播的噪声隔绝、隔断、分离的材料。

(4) 防水材料,是保证建筑物免受雨水、地下水及其他水分侵入的材料。

(5) 装饰材料,是装修各类土木建筑物以提高其使用功能和美观,保护主体结构在各种环境因素下的稳定性和耐久性的材料及其制品。

(四) 按使用部位分类

(1) 结构材料,以强度、硬度、塑性、韧性等力学性质为主要性能指标的工程材料。

(2) 墙体材料,用于建筑墙体的材料。

(3) 屋面材料,用于建筑屋面的材料。

(4) 地面材料,用于建筑物内部和周围地表的铺筑层和楼层表面的铺筑层的材料。

(5) 饰面材料,用于建筑物表面装饰的材料。

第二节 土木工程材料在工程建设中的重要性

土木工程材料是一切土木工程的重要物质基础和质量基础。没有材料,无从建设。高层建筑、公路、铁路、机场、港口、桥梁、大坝、国防工程等均由千姿百态、性能各异的土木工程材料建设而成。土木工程材料的品种、规格直接影响工程结构形式和施工方法。由于组分、结构和构造不同,土木工程材料品种繁多、性能各不相同、价格相差悬殊,加之材料所占比重较大,材料质量的优劣和选用是否得当直接关系到工程的安全、适用、美观、耐久和经济性。

土木工程材料在很大程度上决定了工程造价。土木工程材料在工程总造价中占有很大的比重,材料费用一般占工程总造价的 50% 左右,有些甚至可高达 70%~80%。

土木工程材料的发展推动建筑技术的发展。建筑技术的进步与土木工程材料的发展有着密不可分的联系,它们相互推动又相互制约。土木工程的结构形式和施工方法常常受到土木工程材料性能的制约,工程建设中的许多技术难题的解决,往往依赖于土木工程材料问题的突破;新型土木工程材料的出现又促进结构设计和施工技术的革新,如 20 世纪出现的预应力混凝土、轻质板材、人造石材、复合防水材料、玻璃、陶瓷等引起了建筑业的革命,为大跨度、高层、悬挑轻型、耐火耐震等新的结构形式提供了可能,带来建筑技术的大飞跃。

由于在工程的规划、设计、施工和管理各个阶段均会遇到许多土木工程材料问题,无论是从事工程设计、施工的人员还是管理人员,都必须具备必要的土木工程材料知识,做到合理用材、节约用材,以充分发挥材料的特性,提高工程质量,减少工程投资。在材料选择、储运、保管、使用和检验评定等各个环节中,任何失误都可能造成工程质量事故。

第三节 土木工程材料的历史和发展

土木工程材料的发展是随着人类社会生产力的发展和科学技术水平的提高而发展的。人类最早穴居巢处,到石器、铁器时代,人类能制造简单的工具,开始挖土、凿石为洞、伐木搭竹为棚,利用天然材料建造简陋的房屋。早在公元前 3000~前 2000 年,人类就能用黏土烧制砖、瓦,用岩石烧制石灰、石膏,土木工程材料由天然材料进入人工生产阶段,具备了较大

规模建造房屋的条件。十八、九世纪,由于资本主义兴起,工商业迅速发展,土木工程材料进入了一个新的发展阶段。钢材、水泥、混凝土及其他材料相继问世,为现代土木工程建设奠定了基础。进入 20 世纪,社会生产力发展迅猛,加之材料科学与工程学科的形成和发展,土木工程材料的性能和质量有了极大提高,而且品种更加丰富,功能材料等新型土木工程材料不断涌现。

改革开放以来,我国的土木工程材料工业有了巨大发展,许多重要的土木工程材料的年产量已经位居世界前列,但传统的生产增长方式使我国在资源、能源和生态环境等方面付出了沉重代价。进入 21 世纪,全球性的生存环境恶化问题更加突出,表现在人口爆炸性增长、资源日益匮乏、森林锐减、河湖干涸、土地沙化、气候异常等,制约了经济社会的可持续发展。为此,土木工程材料行业需要建立循环节约型的生产方式,需要采用清洁的生产技术,少用天然资源,大量使用工农业或城市固体废弃物。土木工程材料应朝着研制高性能材料、节约资源和能源、有利健康和循环利用的方向发展。

第四节 土木工程材料的技术标准

产品标准化是现代社会化大生产的产物,是组织现代化大生产的重要手段,也是科学管理的重要组成部分。

技术标准是产品质量的技术依据,也是供需双方对产品进行质量检查、验收的依据。生产企业必须按标准生产合格产品,所以技术标准可促进企业改善管理,提高生产率,实现生产过程合理化。使用部门应按标准选用材料、按规范进行设计和施工,使设计和施工标准化,以加快施工进度,降低工程造价,确保工程质量。

目前,我国在土木工程材料的生产、设计、施工等许多方面都制订了相关技术标准。随着土木工程材料科技的发展,土木工程材料的技术标准也在不断变化。国家和相关标准化管理部门根据需要,颁布一些新的技术标准,修订或废止一些旧的技术标准,并逐步与国际标准接轨。

对于从事土木工程材料生产、设计、施工、管理、科研的人员以及土木工程材料的使用人员,熟悉和运用土木工程材料的技术标准有着十分重要的意义。在选用材料时,必须严格执行有关技术标准;在使用代用材料时,必须按标准进行试验和论证;对于新材料必须经过鉴定。研究、生产和使用土木工程材料时,还要结合我国的国情,从可持续发展的高度,因地制宜,节约和合理用材,使我国的土木工程材料工业能够持续健康地发展。

一、技术标准的分类

我国的技术标准分为四类,即国家标准、行业标准、地方标准和企业标准。

各级标准分别由相应的标准化管理部门批准并颁布。国家质量监督检验检疫总局是国家标准化管理的最高机构。国家标准和行业标准都是全国通用标准,是国家指令性文件,各级生产、设计、施工等部门均必须严格遵照执行。

二、技术标准的表示方法

技术标准由名称、代号、标准号(编号)和年代号(批准年份)组成。土木工程材料技术标

准常见的代号有:GB——国家标准;GB/T——国家推荐标准;GBJ——建筑工程国家标准;JC——建材行业标准;SL——水利行业标准;DL——电力行业标准;JT——交通行业标准;DB——地方标准;QB——企业标准等。例如:《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2007);《公路工程土工合成材料试验规程》(JTGE50—2006);《预应力混凝土用钢棒》(GB/T 5223.3—2005);《普通混凝土用砂石质量及检验方法标准》(JGJ 52—2006);《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2000);《混凝土外加剂》(GB 8076—2008)等。

三、技术标准的内容

技术标准一般包括产品规格、分类、技术要求、检验方法、验收规则、标志、运输和储存等。

四、其他技术标准

除了使用国内技术标准外,某些情况下还可能采用一些其他技术标准,如ISO——国际标准、ANS——美国国家标准、ASTM——美国材料与试验学会标准、BS——英国标准、DIN——德国工业标准、JIS——日本工业标准、NF——法国标准、CSA——加拿大标准协会标准等。

第五节 土木工程材料的学习要求

“土木工程材料”是“大土木”类专业的一门重要的学科基础课,主要讲述土木工程、水利水电工程、港口航道与海岸工程、交通工程等工程中常用的各种材料。通过本课程的学习,掌握各种土木建筑工程中应用的主要材料的技术性质、品种规格、适用范围、检验方法及储运知识等,在工程设计中能合理的选材、施工中能正确用材,为学生学习后续专业课程提供必要的基本知识,也为学生今后从事工程实践和科学研究打下坚实的基础。

本课程是一门实践性很强的叙述性课程,具有内容多、概念多、知识面广、系统性不强等特点,加上新材料、新工艺层出不穷和学生缺少实际工程经验,学生往往对学习本课程不太适应。考虑到学习本课程的学生今后多数是材料的使用者,故在学习过程中,应以各种材料的技术性质、质量检验及其在工程中的应用为重点,并需注意材料的原料、生产过程、组成、构造等对其性能的影响,以便理解材料为什么具有这样的性质,掌握各项性能之间的有机联系。要特别重视材料性能的条件性和变化,防止材料在使用前变质,保证工程的耐久性。土木工程材料的性能具有很强的条件性,材料的性能是在一定的条件下测得的,同一种材料在不同条件下测得的性能往往不同。此外,材料的性质不是固定不变的,在运输、储存和使用过程中,材料的性质会发生不同程度的改变。

试验课是本课程的重要教学环节,也是本课程的重要组成部分,其任务是验证基本理论、学习试验方法。土木工程材料试验是一门与生产密切联系的科学技术,工程上检验材料质量、确定设计施工依据、改善材料性能、使用新材料及选用代用材料等均需进行土木工程材料试验。通过试验操作并对试验结果进行分析,一方面可以学会常用材料的检验方法、丰富感性认识,加深理论知识的理解;另一方面可以培养科学研究的兴趣和严肃认真、实事求是的科学作风,提高分析问题、解决问题的能力。

第一章 土木工程材料的基本性质

土木工程材料是构成土木工程的物质基础,在工程结构中发挥各种不同的作用,要求具有相应的性质,例如:构成梁、板、柱以及承重墙等承重构件的材料要有一定的强度和刚度,防水材料要有抗渗性要求,保温材料应具有保温、不易传热、隔热的性质等。在实际使用过程中,结构经常受到多种环境因素的共同作用,使材料性能劣化,甚至发生破坏。例如:房屋屋面承受风、雨、冰冻、日晒等自然因素的作用;地基在承受建筑物全部荷载的同时,还可能受到地下水侵蚀和冰冻破坏;航道护坡等受到水和泥沙的冲刷,以及温度、湿度变化和冻融作用,环境水或空气中所含有害成分的化学侵蚀作用等。因此,在保证工程结构使用功能和安全性的基础上,土木工程材料本身还需具有抵抗这些破坏作用的性质,以保证在实际环境中经久耐用。

一般而言,材料的性质是指其在荷载与环境因素共同作用下材料所具有的属性,主要取决于材料的组成和结构状态,因此工程中讨论的材料各种性质,是指在一定环境条件下测试的性能指标。这些性质归纳起来包括材料的物理性质、力学性质和耐久性等。

本章将具有共性和比较重要的材料性质作为基本性质重点论述,材料的组成、结构、构造与性能之间的关系也将在本章中介绍。

第一节 材料的物理性质

一、密度、表观密度、视密度和堆积密度

材料的密度是指材料的质量与体积之比。根据材料所处状态不同,可分为密度、表观密度、视密度和堆积密度。

(一) 密度

密度是指材料在绝对密实状态下单位体积的质量。材料的密度可表示为

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

式中: ρ 为密度, g/cm^3 ; m 为材料在干燥状态下的质量, g ; V 为干燥材料在绝对密实状态下的体积,或称绝对体积, cm^3 。

一般认为,材料密度的大小取决于材料的组成及微观结构,因此,具有相同组成及微观结构的材料,其密度为定值。

(二) 表观密度

表观密度,也称为体积密度,是指自然状态下(包含材料实体及其内部开口孔隙、闭口孔隙)单位体积材料的质量。表观密度可表示为

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

式中: ρ_0 为表观密度, kg/m^3 或 g/cm^3 ; m 为材料的质量, kg 或 g ; V_0 为材料包含孔隙条件下的体积(包括开口孔隙和闭口孔隙), m^3 或 cm^3 。

在自然状态下, 材料实体内常含有孔隙, 其中相互连通, 且与外界相连的孔称为开口孔; 相互独立, 不与外界相通的孔称为闭口孔。通常, 材料在自然状态下的体积包含材料内部开口孔与闭口孔的体积。

每种材料的密度是固定不变的, 但材料的表观密度与含水情况有关。当材料含有水分时, 其自然状态下质量、体积的变化会导致表观密度的改变, 故对所测定的材料而言, 其表观密度必须注明含水状态。通常, 材料表观密度是指在气干状态(长期在空气中存放的干燥状态)下的表观密度。材料在烘干状态下测得的表观密度, 称为干表观密度; 材料在潮湿状态下测得的表观密度, 称为湿表观密度。根据不同的行业, 会采用不同的表观密度, 如水利工程中原材料属性常用湿表观密度标注, 而建筑工程中一般选用气干状态下的表观密度。

(三) 视密度

视密度是指材料在自然状态不包括开口孔隙时的单位体积的质量。视密度可表示为

$$\rho' = \frac{m}{V'} \quad (1-3)$$

式中: ρ' 为材料的视密度, kg/m^3 或 g/cm^3 ; m 为材料的质量, kg 或 g ; V' 为材料在自然状态下材料实体及内部闭口孔隙的体积, m^3 或 cm^3 。

因此, 包含闭口孔隙条件下的材料体积通常采用排液置换法或水中称重法测量。

(四) 堆积密度

堆积密度是指散粒或粉状材料在堆积状态下, 单位体积(含物质实体及内部闭口孔、开口孔及颗粒间空隙)的质量。堆积密度可表示为

$$\rho_1 = \frac{m}{V_1} \quad (1-4)$$

式中: ρ_1 为材料的堆积密度, kg/m^3 ; m 为材料的质量, kg ; V_1 为材料的堆积体积, m^3 。

材料的堆积密度反映散粒材料堆积的紧密程度及材料可能的堆放空间, 根据堆放的紧密程度不同, 堆积密度又可分为疏松堆积密度、振实堆积密度和紧密堆积密度三种。

材料的堆积体积包括材料绝对体积、内部所有孔隙体积和颗粒间的空隙体积。由于所测的自然状态的颗粒体积大于颗粒的密实体积, 且自然状态包括开口孔隙和闭口孔隙, 颗粒材料的密度 $\rho >$ 颗粒材料的视密度 $\rho' >$ 颗粒材料的表观密度 $\rho_0 >$ 颗粒材料的堆积密度 ρ_1 。

几种常用材料的密度、表观密度及堆积密度的参考值, 见表 1-1。

表 1-1 几种常用材料的密度、表观密度及堆积密度

材料	密度/(g/cm^3)	表观密度/(kg/m^3)	堆积密度/(kg/m^3)
建筑钢	7.85	7850	—
花岗岩	2.60~2.80	2500~2700	—
石灰岩	2.60~2.70	1800~2600	—
普通黏土砖	2.50~2.80	1600~1800	—

续表

材料	密度/(g/cm ³)	表观密度/(kg/m ³)	堆积密度/(kg/m ³)
黏土空心砖	2.50~2.80	1000~1400	—
木材	1.55	400~800	—
普通水泥	2.90~3.15	—	1200~1300
泡沫塑料	—	20~50	—
石油沥青	0.90~1.00	—	—
普通混凝土	—	2100~2600	—
石英砂	2.60~2.65	—	1300~1600
黏土	2.50~2.60	—	1600~1800

二、材料的孔隙率和空隙率

(一) 孔隙率与密实度

孔隙率是指在自然状态下材料内部孔隙体积占材料总体积的百分率。材料的孔隙率 P 表示为

$$P = \frac{V_0 - V}{V_0} \times 100\% = \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right) \times 100\% \quad (1-5)$$

密实度是与孔隙率相对应的概念,指材料体积被固体物质充实的程度。材料的密实度 D 表示为

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

孔隙率与密实度从两个方面反映材料的致密程度,孔隙率小则密实度高,应用式(1-5)和式(1-6),可得 $P + D = 1$ 。

孔隙率的大小直接反映材料结构(或构造)的疏密程度。材料的许多性质,如强度、热工性质、声学性质、吸水性、吸湿性、抗渗性、抗冻性等都与孔隙有关。这些性质不仅与材料的孔隙率有关,而且与材料的孔隙特征有关。孔隙特征是指孔的种类(开口孔或闭口孔)、孔径的大小及孔的分布是否均匀等。实际上闭口孔是不存在的,在土木工程中,孔的开口类型以常温、常压下水能否进入来区分。

对应于开口孔和闭口孔的孔隙率分别称为开口孔隙率 P_k 和闭口孔隙率 P_b ,即

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

$$P_b = P - P_k \quad (1-8)$$

式中: V_k 为开口孔的体积, m^3 (cm^3)。

孔隙率小且开口孔较少的材料,不易吸收水分,强度较高,同时具有较好的抗渗性和抗冻性,因此常采用降低孔隙率和改善孔隙特征的方法改善材料的性能。

(二) 空隙率与填充率

空隙率是指散粒状材料在堆积体积状态下颗粒固体物质间空隙体积占堆积体积的百分率。材料的空隙率 P' 表示为

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

空隙率的大小反映了散粒材料的颗粒相互填充的致密程度。当计算混凝土中粗集料的空隙率时,由于混凝土拌和物中的水泥浆能进入石子的开口孔内,开口孔体积也是空隙率体积的一部分,这时应按石粒的视密度 ρ' 代替表观密度 ρ_0 进行计算。

填充率是指散粒状材料在自然堆积状态下,其中的颗粒体积(包括内部开口孔隙和闭口孔隙体积)占自然堆积状态下的体积的百分率。材料的填充率 D' 表示为

$$D' = \frac{V_0}{V_1} \times 100\% = \frac{\rho_1}{\rho_0} \times 100\% \quad (1-10)$$

空隙率和填充率分别从不同侧面反映散粒状材料的颗粒相互填充的疏密程度,即 $P' + D' = 1$ 。

三、材料与水有关的性质

(一) 亲水性与憎水性

固体材料与水接触时,当液滴与固体在空气中接触达到平衡时,会出现两种不同的现象,如图 1-1 所示。根据材料与水接触时界面上不同的状态,分为亲水性材料和憎水性材料两类。

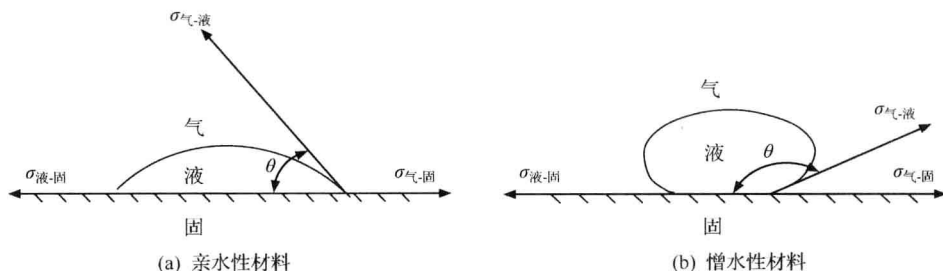


图 1-1 材料的润湿示意图

图 1-1 中 $\sigma_{\text{气-固}}$ 、 $\sigma_{\text{气-液}}$ 及 $\sigma_{\text{液-固}}$ 分别表示气-固、气-液及液-固相界面间的界面张力, θ 为接触角,即从三相接触点,沿气-液表面所引切线与液-固表面所形成的夹角。从图 1-1 可以明显看出,液体能否润湿固体,与接触角大小有关,当三力达到平衡时具有以下关系

$$\sigma_{\text{气-固}} = \sigma_{\text{液-固}} + \sigma_{\text{气-液}} \cos \theta$$

或

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{\text{气-固}} - \sigma_{\text{液-固}}}{\sigma_{\text{气-液}}}$$

从上式可以看出,接触角大小与界面张力大小有关:当 $\theta = 0$, $\cos \theta = 1$,液体完全润湿固体时, $\sigma_{\text{气-固}} - \sigma_{\text{液-固}} = \sigma_{\text{气-液}}$;当 $\theta \leq 90^\circ$, $0 \leq \cos \theta \leq 1$,此时水在材料表面易于扩散,水能润湿固体时, $\sigma_{\text{气-固}} - \sigma_{\text{液-固}}$ 不小于 0 但不大于 $\sigma_{\text{气-液}}$ 。这表明固体与液体接触界面上的张力不大于固体与气体接触界面的张力(即固体表面张力)时,液体能润湿固体,该材料称为亲水性材料;当 $\theta > 90^\circ$, $\sigma_{\text{气-固}} - \sigma_{\text{液-固}} < 0$,则液体不能润湿固体,即固体与液体接触界面上的张力大于固体与气体界面的张力时,液体不能润湿固体,该材料称为憎水性材料。

该现象也可用水分子之间内聚力和水分子与材料分子间的吸引力之间的关系来描述：当水分子之间内聚力大于水分子与材料分子间的吸引力，则表明材料不会被水浸润，是憎水性材料；反之，材料为亲水性材料。大多数建筑材料，如石料、砖、混凝土、木材等，都属于亲水性材料；沥青、石蜡等为憎水性材料。

亲水性材料能通过毛细管作用，将水分吸入材料内部；憎水性材料一般可以阻止水分渗入毛细管，故能降低材料的吸水作用。对于有抗渗、抗冻要求的亲水性材料，往往需要进行表面处理，在其表面涂抹一层憎水性材料以阻止水分进入，提高其耐久性能。

（二）吸湿性与吸水性

材料的吸湿性是指材料在潮湿空气中吸收水分的性质，以含水率表示。吸湿作用一般是可逆的，也就是说材料既可吸收空气中的水分，也可向空气中释放水分。

含水率是指材料中所含水的质量与干燥状态下材料的质量之比，可以表示为

$$W = \frac{G_0 - G}{G} \times 100\% \quad (1-11)$$

式中： W 为材料的含水率，%； G_0 为材料含水状态下的质量，g； G 为材料在干燥状态下的质量，g。

材料的吸湿性受环境影响较大。干的材料在潮湿的空气中易吸收空气中的水分，而逐渐变湿；湿的材料在干燥的空气中会失去水分，而逐渐变干，最终材料中的水分将与周围空气的湿度达到平衡，这时的材料处于气干状态。材料在气干状态下的含水率，称为平衡含水率。平衡含水率是变化的，它随着环境温度与湿度的改变而改变。

影响材料吸湿性的因素较多，除了上面提到的环境温度和湿度的影响外，材料的亲水性和憎水性、孔隙率和孔隙特征等对吸湿性都有影响。

材料的吸水性是指材料在水中吸收水分的性质。材料吸水达到饱和状态时的含水率，称为材料的吸水率。吸水率反映材料的吸水性能，其衡量指标可用质量吸水率和体积吸水率两种方式表达。

材料质量吸水率 W_m 是材料吸入水的质量与干燥状态下材料质量之比，可以表示为

$$W_m = \frac{G_1 - G}{G} \times 100\% \quad (1-12)$$

式中： G 为材料干燥状态下的质量，g； G_1 为材料吸水饱和状态的质量，g。

体积吸水率 W_v 是材料在吸水饱和状态下吸水体积占材料体积的百分比，可以表示为

$$W_v = \frac{G_1 - G}{V_0} \times 100\% \quad (1-13)$$

式中： ρ_k 为水的密度，一般按 1.0g/cm^3 计。

将式(1-13)除以式(1-12)，可得 W_v 与 W_m 的关系为

$$W_v = \frac{\rho_0 W_m}{\rho_k} \quad (1-14)$$

式中： ρ_0 为材料的干表观密度。

土木工程材料在实际使用中，如不做特别说明，吸水率一般指质量吸水率。

材料的吸水性不仅与其亲水性与憎水性有关，也与其孔隙率大小及孔隙特征有关。一

般认为:孔隙率越大,吸水性越强;水分不易进入封闭的孔隙;粗大开口的孔隙不易吸满水分;具有很多微小开口孔隙的材料,其吸水能力特别强。

各种材料的吸水率相差很大,如花岗岩等致密岩石的质量吸水率为 0.05%~0.7%,普通混凝土为 2%~3%,普通黏土砖为 8%~20%,而木材等多孔隙材料的质量吸水率常大于 100%。

材料的吸湿性和吸水性均会对材料的性能产生不良影响,使材料的表观密度和导热性增大,强度降低,易受冰冻破坏。一般认为材料的吸湿性和吸水性大是不利的。

(三) 耐水性

材料的耐水性是指材料在水的作用下不损坏,其强度也不显著降低的性质。材料的耐水性以软化系数 $K_{\text{软}}$ 表示为

$$K_{\text{软}} = \frac{\text{材料在水饱和状态下的抗压强度}}{\text{材料在干燥状态下的抗压强度}}$$

由上式可知, $K_{\text{软}}$ 的大小反映材料浸水后强度降低的程度。软化系数越小,说明材料吸水饱和后强度降低得越多,耐水性越差。

材料在浸水后强度降低的原因是水分子的存在会削弱材料微粒间的结合力,因此一般材料在含水时,其强度均出现不同程度降低。如果材料中含有一些易被水溶解或软化的物质,如黏土、可溶盐等,则强度降低更为严重。因此,选择材料时常需要考虑其耐水性(软化系数)特征,通常将软化系数大于 0.85 的材料看作是耐水材料。在设计长期处于水中或潮湿环境中的重要结构,其材料的软化系数不宜小于 0.85;用于受潮较轻或次要结构的材料,其软化系数也不宜小于 0.70。

(四) 抗渗性

材料的抗渗性是指材料在压力水作用下抵抗渗透的性质。

材料抗渗性常用渗透系数来表示。根据达西定律,在一定时间内,透水量与过水断面面积及水头差成正比,与材料的厚度成反比,渗透系数 K 表示为

$$K = \frac{Q}{At} \frac{d}{H} \quad (1-15)$$

式中: K 为渗透系数, mm/s 或 mL/(cm² · s); Q 为透水量, mL; A 为过水断面面积, cm²; d 为材料厚度, cm; H 为水头差, cm; t 为透水时间, s。渗透系数越小表示材料抗渗性越好。

材料的抗渗性也可用抗渗等级表示。抗渗等级常用于混凝土和砂浆材料,是用材料所能抵抗压力水渗透的最大压力值来确定的。抗渗等级越大,材料的抗渗性越好。

材料的抗渗性与其孔隙率及孔隙特征有关。材料越密实、闭口孔隙越多、孔径越小,越不容易渗水;具有较大孔隙率、孔径较大且孔相互连通,材料越易渗水。同时材料的亲水性与憎水性也对抗渗性有一定的影响。

抗渗性是决定材料耐久性的重要因素,对于地下建筑、水工建筑物和压力容器等结构,因常受到水的作用,所用材料应具有一定的抗渗性。同时,抗渗性也是检验防水材料的一个重要指标。