



“十三五”普通高等教育本科规划教材

(第二版)

土木工程材料

贾致荣 主 编

贺东青 丁凌凌 副主编

孟宏睿 钱红梅 梁晓飞



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育本科规划教材

(第二版)

土木工程材料

主 编 贾致荣
副主编 贺东青 丁凌凌
孟宏睿 钱红梅 梁晓飞
主 审 严作人



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十三五”普通高等教育本科规划教材。本书以土木工程材料的性能及合理使用为中心,全书共11部分,包括:绪论、材料的基本性质、建筑钢材、无机胶凝材料、水泥混凝土与砂浆、墙体材料、沥青与沥青混合料、木材、建筑塑料与胶黏剂、建筑功能材料及土木工程材料试验。各章附有内容提要和学习要求,增加了案例分析、例题、专业词汇英文翻译,精选了各种类型的练习题,并在书后附有答案。

本书根据土木工程专业的培养要求并融合最新技术标准编制,在紧扣基本概念、基本理论、基本方法、基本操作的前提下,理论联系实际,突出实用性,追求“知识、能力、素质”的有机统一,兼顾学生创新精神的培养。

本书可用作高等院校土木工程专业教材,也可作为土木、建筑类其他相关专业教学用书,以及自学考试、职业教育等用书;还可供从事土建工作的科研、设计、施工、管理和监理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

土木工程材料/贾致荣主编. —2版. —北京:中国电力出版社, 2016.8

“十三五”普通高等教育本科规划教材

ISBN 978-7-5123-9338-7

I. ①土… II. ①贾… 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 (2016) 第 103799 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 http://jc.cepp.com.cn)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2009年3月第一版

2016年8月第二版 2016年8月北京第六次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 19.25印张 469千字

定价 40.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

《土木工程材料》第一版自出版以来,已被很多学校采用,受到所选用院校师生的欢迎,重印多次。随着行业的发展,一批新规范陆续出版,同时高校提出了教学新要求,故决定修订出版第二版。本书继续以高等学校土木工程专业委员会制定的《土木工程材料教学大纲》为基本依据,适应土木工程专业的建筑工程、交通土建等专业方向,并兼顾建筑学专业及土建类其他相关专业建筑材料课程的需要,具有较宽的专业适用面。第二版具有以下特点:

(1) 在第一版教材基础上,结合正在实施的应用型卓越工程师培养改革,突出应用型人才培养。

(2) 全部按照国家 and 行业最新的现行标准、规范编写、修订,涉及约 30 本新标准及规范。

(3) 增加了案例分析、例题、专业词汇英文翻译,更新了复习思考题及答案。

(4) 体现非研究型的实用型教材特色,既有较完整的理论,又强调了工程实用性,并能反映当代材料科学的最新技术。

(5) 本书适应未分专业方向时的土木工程专业教学采用。

(6) 本书各章附有内容提要和学习要求,精选了各种类型的练习题,并在书后附有答案,非常实用和有利于学生自学。练习题题型多样,可供学生参加各类考试时作为训练使用。

(7) 本书对各行业技术标准不统一的现状有所交代,提示学生根据工程实际选用。

本书由贾致荣主编,贺东青、丁凌凌、孟宏睿、钱红梅、梁晓飞共同编写、修订。各章编写分工为:绪论、第1章、第6章由贾致荣编写,第2章由孟宏睿编写,第3章(3.1)、第4章由贺东青编写,第9章、土木工程材料试验由丁凌凌编写,第3章(3.2~3.4)、第8章由钱红梅编写,第5章、第7章由梁晓飞编写。袁中玉、王立志参与了本书的绘图及资料整理工作。全书由贾致荣统稿,由同济大学严作人教授审阅,提出许多宝贵意见,在此表示感谢!

本书得到了山东省本科高校教学改革研究重点项目资助(2015Z072)。

本书可用作高等院校土木工程专业教材,也可作为土木、建筑类其他相关专业教学用书,以及自学考试、职业教育等用书;还可供从事土建工作的科研、设计、施工、管理和监理人员参考。

由于材料科学发展迅速,新材料、新制品、新工艺不断涌现,有一些行业技术标准也不统一,加之水平所限,书中疏漏和不妥之处在所难免,敬请广大读者不吝指正。

编 者

2016年3月

第一版前言

本书以高等学校土木工程专业委员会制定的“土木工程材料教学大纲”为基本依据，结合最新规范和标准，适应土木工程专业的建筑工程、交通土建等专业方向，并兼顾建筑学专业及土建类其他相关专业建筑材料课程的需要，具有较宽的专业适用面。本书具有以下特点：

(1) 2009年以来，国家又有一批新的设计、施工规范和材料标准出台，原有的规范、标准有的也作了更新，这些内容需要及时反映到新教材中去。为此，本教材全部按照国家 and 行业最新的现行标准、规范编写，如《建筑砂浆基本性能试验方法标准》(JGJ/T 70—2009)、《冷轧带肋钢筋》(GB 13788—2008)、《塑性体改性沥青防水卷材》(GB 18243—2008)等。

(2) 本书定位为非研究型的实用型教材，既有较完整的理论，又强调了工程实用性，并能反映当代材料科学的最新技术。

(3) 很多的《土木工程材料》教材，往往只适应于建筑工程专业方向，仍属《建筑材料》教材的内容，而不能真正适应交通土建等专业方向，专业适应面窄。本教材克服了 this 缺点，特别适应未分专业方向时的土木工程专业的教学。

(4) 本书删除和缩减了已显陈旧的或不常用的一些传统材料，更新和补充了新型土木工程材料。

(5) 本书各章精选了各种类型的练习题，并在书后附有答案，非常实用并有利于学生自学。练习题题型多样，可供学生参加各类考试前训练使用。

(6) 本书对各行业技术标准不统一的现状有所交代，提示学生根据工程实际选用。

本书由山东理工大学的贾致荣担任主编，河南大学的贺东青、河南城建学院丁凌凌、陕西理工学院的孟宏睿、长江大学的龚平为副主编，皖西学院的钱红梅参编。各章编写人员为：绪论、第1章、第6章由贾致荣编写，第2章由孟宏睿编写，第3章(3.1)、第4章由贺东青编写，第3章(3.2~3.4)、第8章由钱红梅编写，第5章、第7章由龚平编写，第9章、土木工程材料试验由丁凌凌编写。全书由贾致荣统稿。

同济大学严作人教授审阅了本书，并提出了宝贵意见；本书在编写过程中得到了中国电力出版社的大力帮助，在此一并表示感谢。

本书可用作高等院校土木工程专业教材，也可作为土木、建筑类其他相关专业教学用书，以及自学考试、职业教育等用书。本书还可供从事土建工作的科研、设计、施工、管理和监理人员参考。

由于材料科学发展迅速，新材料、新制品、新工艺不断涌现，有一些行业技术标准也不统一，加之我们水平所限，书中疏漏和不妥之处难免，谨请广大读者和老师们不吝指正。

编者

目 录

前言

第一版前言

绪论	1
第1章 材料的基本性质	4
1.1 材料的组成、结构和构造	4
1.2 材料的基本物理性质	6
1.3 材料的基本力学性质	15
1.4 材料的耐久性	17
复习思考题	18
第2章 建筑钢材	20
2.1 钢材的分类	20
2.2 建筑钢材的主要技术性能	22
2.3 钢材的组织结构及其对性能的影响	28
2.4 钢材的冷加工强化、时效强化、热处理和焊接	30
2.5 钢材的防腐蚀与防火	32
2.6 建筑钢材的品种与选用	35
复习思考题	52
第3章 无机胶凝材料	55
3.1 气硬性胶凝材料	55
3.2 硅酸盐水泥	62
3.3 掺混合材料的硅酸盐水泥	73
3.4 特性水泥和专用水泥	78
复习思考题	81
第4章 水泥混凝土与砂浆	83
4.1 普通混凝土的组成材料	84
4.2 普通混凝土的主要技术性质	99
4.3 混凝土质量控制	112
4.4 普通混凝土的配合比设计	117

4.5 其他种类混凝土	127
4.6 砂浆	134
复习思考题	144
第5章 墙体材料	146
5.1 砌墙砖	146
5.2 砌块及板材	152
5.3 砌筑石材	157
复习思考题	160
第6章 沥青与沥青混合料	162
6.1 沥青材料	162
6.2 沥青混合料	178
复习思考题	196
第7章 木材	198
7.1 木材的分类及构造	198
7.2 木材的性质与应用	200
7.3 木材的防护	204
复习思考题	205
第8章 建筑塑料与胶黏剂	206
8.1 高分子化合物基本知识	206
8.2 建筑塑料	207
8.3 胶黏剂	214
复习思考题	217
第9章 建筑功能材料	218
9.1 绝热材料	218
9.2 吸声与隔声材料	222
9.3 防水材料	224
9.4 装饰材料	238
复习思考题	253
土木工程材料试验	255
试验1 材料的基本性质试验	255
试验2 钢筋试验	258
试验3 水泥试验	261
试验4 混凝土用骨料试验	270
试验5 普通混凝土试验	276
试验6 建筑砂浆试验	281

试验 7 石油沥青试验	284
试验 8 沥青混合料试验	288
综合设计试验 1 普通混凝土配合比设计试验	294
综合设计试验 2 热拌沥青混合料目标配合比设计试验	295
复习思考题参考答案	296
参考文献	299

绪 论

1. 土木工程材料的分类

土木工程材料是指土木工程中使用的各种材料及制品，它是一切土木工程的物质基础。能用于土木工程的材料品种繁多，如水泥、钢材、木材、混凝土、砌墙砖、石灰、沥青、瓷砖等。土木工程材料可按不同原则进行分类。

（1）按化学组成分类。根据组成物质的化学成分，可分为有机材料、无机材料、复合材料三大类，各大类又可细分，见表 0-1。

表 0-1 土木工程材料按化学组成分类

有机材料	植物质材料	木材、竹材、植物纤维及其制品
	高分子材料	有机涂料、橡胶、胶黏剂、塑料
	沥青材料	石油沥青、煤沥青、沥青制品
无机材料	金属材料	钢铁金属：钢、铁、合金钢等 非铁金属：铝、铜及其合金等
	非金属材料	天然石材：砂、石及石材制品等 烧土制品：砖、瓦、陶瓷等 胶凝材料：石灰、水泥、石膏、水玻璃等 混凝土及硅酸盐制品：混凝土、砂浆及硅酸盐制品
复合材料	无机非金属材料与有机材料复合	玻璃纤维增强塑料、聚合物混凝土、沥青混合料等
	金属材料与无机非金属材料复合	钢纤维混凝土、钢筋混凝土等
	金属材料与有机材料复合	轻质金属夹心板等

（2）按使用功能分类。通常分为承重结构材料、非承重结构材料及功能材料三大类。

1）承重结构材料，主要指梁、板、基础、墙体和其他受力构件所用建筑材料。最常用的有钢材、混凝土、砖、砌块等。

2）非承重结构材料，主要包括框架结构的填充墙、内隔墙和其他围护材料等。

3）功能材料，主要有防水材料、装饰材料、绝热材料、吸声材料、隔声材料等。

2. 土木工程与材料的关系

（1）材料是土木工程的物质基础和质量基础。任何一种建筑物或构筑物都是用土木工程材料按某种方式组合而成的，没有土木工程材料，就没有土木工程。同时，土木工程材料的性能影响到土木工程的坚固、耐久和适用性，选用性能相适的合格材料是土木工程质量的重要保证。

（2）材料影响土木工程的造价。土木工程材料在土木工程中应用量巨大，材料费用在工程总造价中占有 40%~70%，如何从品种门类繁多的材料中选择物美价廉的材料，对降低工程造价具有重要意义。

(3) 材料对土木工程技术进步起促进作用。在土木工程建设过程中,工程的设计方法、施工方法都与材料密切相关。从根本上说,材料是基础,是决定土木工程结构设计形式和施工方法的主要因素。因此,材料性能的改进、材料应用技术的进步都会直接促进土木工程技术的进步,例如,钢材及水泥的大量应用和性能改进,取代了过去的砖、石、土木,使得钢筋混凝土结构已占领了土木工程结构材料的主导地位。现代玻璃、陶瓷、塑料、涂料等新型材料的大量应用,又把许多建筑物装扮得绚丽多彩。

3. 土木工程材料的发展

土木工程材料是随着社会生产力和科学技术水平的发展而发展的,根据建筑物所用的结构材料,大致分为三个阶段。

(1) 天然材料。天然材料是指取之于自然界,进行物理加工的材料,如天然石材、木材、黏土、茅草等。早在原始社会时期,人们为了抵御雨雪风寒和野兽的侵袭,居于天然山洞或树巢中,即所谓“穴居巢处”。进入石器、铁器时代,人们开始利用简单的工具砍伐树木和苇草,搭建简单的房屋,开凿石材建造房屋及纪念性构筑物,这比天然巢穴进了一步。进入青铜器时代,出现了木结构建筑及“版筑建筑”(又称夯土建筑,通过模板造型,用生土夯筑而成的建筑),建造出了舒适性较好的建筑物。

(2) 烧土制品。到了人类能够用黏土烧制砖、瓦,用石灰岩烧制石灰之后,土木工程材料才由天然材料进入了人工生产阶段。在封建社会,虽然我国古代建筑有“秦砖汉瓦”、描金漆绘装饰艺术、造型优美的石塔和石拱桥的辉煌,但实际上在这一时期,生产力发展停滞不前,使用的结构材料不过砖、石和木材而已。

(3) 钢筋混凝土。18、19 世纪,随着大跨度厂房、高层建筑和桥梁等土木工程的建设,旧有材料在性能上满足不了新的建设要求。土木工程材料在其他有关科学技术的配合下,进入了一个新的发展阶段,相继出现了钢材、水泥、混凝土、钢筋混凝土和预应力钢筋混凝土及其他材料。近几十年来,随着科学技术的进步和土木工程发展的需要,一大批新型土木工程材料应运而生,出现了塑料、涂料、新型建筑陶瓷与玻璃、新型复合材料(纤维增强材料、夹层材料等),但当代主要结构材料仍为钢筋混凝土。

随着社会的进步、环境保护和节能降耗的需要,对土木工程材料提出了更高、更多的要求。因而,土木工程材料将向轻质高强、节约能源、利用废物、智能化、多功能化、绿色化等方向发展。未来的土木工程材料不仅要满足结构物的力学性能、使用功能及耐久性的要求,而且要符合可持续发展的原则,为人类构筑更加温馨、舒适、健康、便捷的生活环境。

4. 土木工程材料的标准化

为了确保土木工程的质量,必须实行土木工程材料的标准化。世界范围内统一使用的是 ISO 国际标准。我国的常用标准有四大类:①国家标准,包括强制性标准(代号 GB)和推荐性标准(代号 GB/T);②行业标准,如建工行业标准(代号 JG)、建材行业标准(代号 JC)、交通行业标准(代号 JT)等;③地方标准(代号 DB);④企业标准(代号 QB)。

对强制性国家标准,任何技术(或产品)不得低于其规定的要求;对推荐性国家标准,表示也可执行其他标准的要求;地方标准或企业标准所制定的技术要求应高于国家标准和行业标准。

技术标准是根据一定时期的技术水平制定的,因而随着技术的发展与使用要求的不断提高,需要对标准进行修订,修订标准实施同时旧标准自动废除。

5. 土木工程材料的学习方法与要求

本课程是土木工程专业学生必修的一门专业基础课,将通过课堂教学和必要的试验,结合现行的技术标准,以土木工程材料的性能及合理使用为中心,进行系统阐述。

(1) 把握重点,强化理解。土木工程材料种类繁多,需要学习和研究的内容范围很广。学生在有限的学习时间内不可能面面俱到,学习需以材料组成、结构、性能与应用为主线,重点是掌握土木工程材料的性能及其应用,而对材料的生产只作一般性了解。

在学习过程中注意回答以下“三问”,可以检验自己的学习效果。①工程材料的组成与结构特点是什么(What)?②在土木工程应用中,工程材料应具有哪些性能及其影响因素(Which)?③在土木工程中如何正确应用或选择这些材料(How)?

(2) 注意学以致用。本课程是一门实践性很强的课程,学生在理论学习的过程中应注重密切联系实际,培养自己分析、解决问题的能力。所以,在学习某种材料时,学生应注重利用一切机会观察已建成或正在施工的土木工程,在实践中理解和验证所学内容,分析为什么选用某种材料,特别分析材料使用“不成功”之处。这对把握材料的性能,加深对基本原理、基本知识的理解非常有帮助。

(3) 认真对待试验。试验课是本课程的重要教学环节,其主要任务是验证基本理论,学习试验方法,培养动手能力和严谨的科学态度。进行试验时,要严肃认真,一丝不苟。要了解试验条件对试验结果的影响,并对试验结果作出正确的分析和判断。

第1章 材料的基本性质

本章主要介绍材料的基本组成、结构和构造，以及材料的基本物理、力学、化学性质及耐久性的基本概念和有关参数。

通过本章学习，要求了解材料学科的有关基本概念，掌握材料各种基本性质。本章的难点是材料的组成及其对材料性质的影响。

1.1 材料的组成、结构和构造

1.1.1 材料的组成

材料的组成（chemical composition）包括材料的化学组成、矿物组成和相组成。材料的组成是决定材料性质的重要因素。

1. 化学组成

化学组成是指构成材料的化学元素及化合物的种类和数量。金属材料以化学元素含量表示，无机非金属材料通常用各种氧化物含量的百分数表示，聚合物是以有机元素链节重复形式表示。当材料处于某一环境中，材料与环境中的物质间必然按化学变化规律发生作用。例如，材料受到酸、碱、盐类物质的侵蚀作用；材料遇火时的可燃性、耐火性；钢材及其他金属材料的锈蚀和腐蚀等。材料在各种化学作用下所表现出的性质都是由其化学组成所决定的。

2. 矿物组成（mineral composition）

将无机非金属材料中具有特定的晶体结构和特定物理力学性能的组织结构称为矿物。矿物组成是指构成材料的矿物种类和数量。如花岗石的主要矿物组成为长石、石英和少量云母，因此酸性岩石多，决定了花岗石耐酸性好，但耐火性差；大理石的主要矿物组成为方解石、白云石，含有少量石英，因此大理石不耐酸腐蚀，酸雨会使大理石表面失去光泽。矿物组成是在材料化学组成确定的条件下，决定材料性质的主要因素。

3. 相组成（phase composition）

将材料中结构相近、性质相同的均匀部分称为相。同一种材料可由多相物质组成。例如：建筑钢材中就有铁素体、渗碳体、珠光体，铁素体软，渗碳体硬，它们的比例不同，就能生产不同强度和塑性的钢材。利用油和水不相溶，形成油包水或水包油的乳液涂料，能产生梦幻般多彩的效果。复合材料是宏观层次上的多相组成材料，如钢筋混凝土、沥青混凝土、塑料泡沫夹心压型钢板，它们的配合比和构造形式不同，材料性质变化可能较大。

1.1.2 材料的结构

材料的结构是决定材料性能的另一个极其重要的因素，可分为微观结构、亚微观结构和宏观结构。

1. 微观结构（microstructure）

材料微观结构是指原子、分子层次的结构，可用电子显微镜或 X 射线来进行分析研究。

它与材料的强度、硬度、弹塑性、熔点、导热性、导电性等重要性质有着密切的关系。

按微观结构,材料又可分为晶体、玻璃体和胶体。

(1) 晶体 (crystal)。在空间上,质点(离子、原子、分子)按特定的规则、呈周期性排列的固体称为晶体。晶体具有特定的几何外形、固定的熔点和化学稳定性。根据组成晶体的质点及化学键的不同,晶体可分为下列几种:

- 1) 原子晶体:中性原子以共价键结合而形成的晶体,如石英。
- 2) 离子晶体:正负离子以离子键结合而形成的晶体,如 NaCl。
- 3) 分子晶体:以分子间的范德华力即分子键结合而成的晶体,如有机化合物。
- 4) 金属晶体:以金属阳离子为晶格,由自由电子与金属阳离子间的金属键结合而成的晶体,如钢铁材料。

从键的结合力来看,共价键和离子键最强,金属键较强,分子键最弱。例如,纤维状矿物材料——玻璃纤维和岩棉,纤维内链状方向上的共价键要比纤维与纤维之间的分子键结合力大得多,这类材料易分散成纤维,强度具有方向性;云母、滑石等结构层状材料的层间键力是分子力,结合力较弱,这类材料易被剥离成薄片;岛状结构材料如石英,硅氧原子以共价键结合成四面体,四面体在三维空间形成立体空间网架结构,因此质地坚硬,强度高。

(2) 玻璃体 (vitreous body)。呈熔融状态材料在急速冷却时,其质点来不及或因某种原因不能按规则排列就产生凝固所形成的结构称为玻璃体。玻璃体又称无定形体或非晶体,结构特征为质点在空间上呈非周期性排列。

玻璃体是化学不稳定结构,容易与其他物质起化学反应,具有较高的化学活性。如生产水泥熟料时,硅酸盐从高温水泥回转窑急速落入空气中,急冷过程使得它来不及作定向排列,质点间的能量只能以内能的形式储存起来,具有化学不稳定性,能与水反应产生水硬性;粉煤灰、水淬粒化高炉矿渣、火山灰等玻璃体材料,常被大量用作硅酸盐水泥的掺和料,以改善水泥性质。

(3) 胶体 (colloid)。以胶粒(粒径为 $10^{-10} \sim 10^{-7} \text{ m}$ 的固体颗粒)作为分散相,分散在连续相介质(如水、气、溶剂)中,形成的分散体系称为胶体。

由于胶体中的分散质与分散介质带相反的电荷,胶体能保持稳定。分散质颗粒细小,使胶体具有吸附性、黏结性。根据分散质与分散介质的相对比例不同,胶体结构分为溶胶、溶凝胶和凝胶。乳胶漆是高分子树脂通过乳化剂分散在水中形成的涂料;道路石油沥青要求高温不软、低温不脆,需具有溶凝胶结构;硅酸盐水泥水化形成的水化产物中的凝胶将砂和石黏结成一个整体,形成人工石材。

2. 亚微观结构 (submicroscopic structure)

亚微观结构是指在光学显微镜和一般扫描透射电子显微镜下能观察到的结构,是介于宏观和微观之间的结构。其尺度范围为 $10^{-9} \sim 10^{-3} \text{ m}$ 。材料的亚微观结构根据其尺度范围,还可分为显微结构和纳米结构。其中,显微结构是指用光学显微镜所能观察到的结构,其尺度范围为 $10^{-7} \sim 10^{-3} \text{ m}$ 。土木工程材料的显微结构,应根据具体材料分类研究。对于水泥混凝土,通常研究水泥石的孔隙结构及界面特性等结构;对于金属材料,通常研究其金相组织,即晶界及晶粒尺寸等。对于木材,通常研究木纤维、管胞、髓线等组织的结构。材料在显微结构层次上的差异对材料的性质有着显著影响。例如,钢材的晶粒尺寸越小,钢材的强度越高;混凝土中毛细孔的数量减少、孔径减小,将使混凝土的

强度和抗渗性等提高。从显微结构层次上改善材料的性能,相对比较容易,具有十分重要的意义。

尺度范围在 $10^{-9} \sim 10^{-3} \text{m}$ 的结构为纳米结构,一般要用扫描透射电子显微镜观察。由于纳米微粒具有独特的小尺寸效应和表面界面效应等基本特性,使由纳米微粒组成的纳米材料具有许多奇异的物理和化学性能,在土木工程中也得到了应用,如磁性液体、纳米涂料等。自 20 世纪 80 年代以来,对纳米结构的研究已引起了人们的广泛关注。

3. 宏观结构 (macrostructure)

材料的宏观结构是指用肉眼或放大镜能够分辨的粗大组织。土木工程材料常见的宏观结构形式有密实结构、多孔结构、纤维结构、层状结构、散粒结构、纹理结构。

(1) 密实结构。密实结构的材料内部基本上无孔隙,结构致密,如钢材、石材、玻璃和塑料等,具有吸水率低、抗渗性好、强度较高等性质。

(2) 多孔结构。多孔结构指材料孔隙率高的结构,如石膏制品、加气混凝土、多孔砖等类材料,质轻,吸水率高,抗渗性差,但保温、隔热、吸声性好。

(3) 纤维结构。纤维结构是由人工或天然纤维物质构成的结构,纤维之间存在相当多的孔隙,如木材、竹、玻璃纤维、石棉等。一般平行纤维方向的抗拉强度较高,质轻、保温、绝热、吸声性能好。

(4) 层状结构。层状结构是天然形成或人工采用黏结等方法将材料叠合成层状的结构,如胶合板、纸面石膏板、泡沫压型钢板复合墙等,各层材料性质不同,但叠合后材料综合性质较好,扩大了材料的使用范围。

(5) 散粒结构。散粒结构指松散颗粒状的材料,有密实颗粒和轻质多孔颗粒之分。前者如砂子、石子等,因其致密,强度高,适合做混凝土骨料;后者如陶粒、膨胀珍珠岩等,因具多孔结构,适合做绝热材料。散粒结构的材料颗粒间存在大量的空隙,其孔隙率主要取决于颗粒大小的搭配。

(6) 纹理结构。天然材料在生长或形成过程中,自然造成的天然纹理,如木材、大理石、花岗石等板材,或人工制造材料时特意造成的纹理,如人造石材、复合地板等,这些天然或人工造成的纹理,使材料具有良好的装饰性。

应该指出的是,长期以来,人们对结构层次的划分、认识和理解并不一致,如有的并不是将结构分成上述三个层次,而是四个层次(把亚微观结构细分),甚至两个层次(将亚微观结构和微观结构合并)。有关微观结构和宏观结构的研究比较多,大家认识也比较一致。

1.2 材料的基本物理性质

1.2.1 材料的体积组成

大多数土木工程材料的内部都含有孔隙,孔隙的多少和孔隙的特征对材料的性能均产生影响,掌握含孔材料的体积组成是正确理解和掌握材料物理性质的起点。

孔隙特征指孔尺寸大小、孔与外界是否连通等。孔隙与外界相连通的叫开口孔,与外界不相连通的叫闭口孔。

含孔材料的体积组成如图 1-1 所示。参照图 1-1 和图 1-2,容易区分材料的以下几种

体积:

(1) 材料绝对密实体积, 用 V 表示, 是指不包括孔隙的材料实体的体积。

(2) 材料的孔体积, 用 V_p 表示, 指材料所含孔隙的体积, 分为开口孔体积 (记为 V_k) 和闭口孔体积 (记为 V_b)。

(3) 材料的表观体积, 又称为细观外形体积, 用 V_0 表示, 指材料的实体体积与材料所含闭口孔体积之和, 即 $V_0 = V + V_b$ 。

(4) 材料的毛体积, 又称为宏观外形体积, 用 V' 表示, 指材料的实体体积与材料所含全部孔隙体积之和 (含开口孔和闭口孔), 即

$$V' = V + V_p = V + V_k + V_b$$

(5) 散粒状材料的堆积体积。如图 1-2 所示, 除了颗粒占有体积外, 颗粒之间还有间隙或空隙, 两者体积之和就是材料的堆积体积。用 V_1 表示材料的堆积体积, 用 V_j 表示颗粒与颗粒之间的间隙体积, 则

$$V_1 = V' + V_j = V + V_p + V_j$$

1.2.2 密度、表观密度、毛体积密度和堆积密度

1. 密度 (density)

在一定温度下, 材料在绝对密实状态下单位体积的质量, 也称为真实密度、真密度、绝对密度, 按式 (1-1) 计算, 即

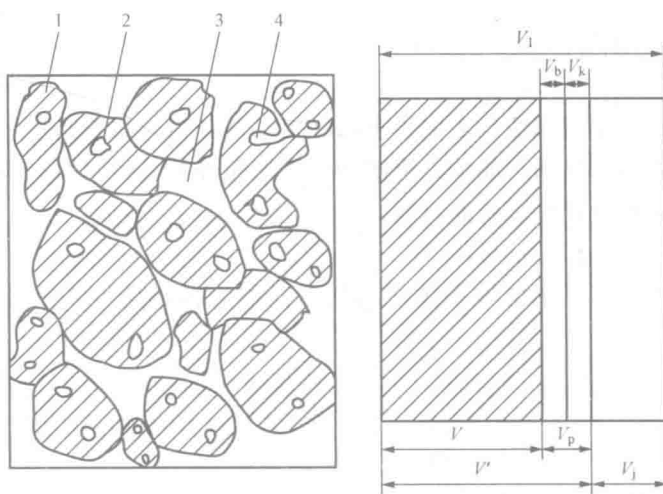


图 1-2 颗粒材料堆积体积示意图

1—颗粒的固体物质; 2—颗粒的闭口孔; 3—颗粒间的间隙; 4—颗粒的开口孔

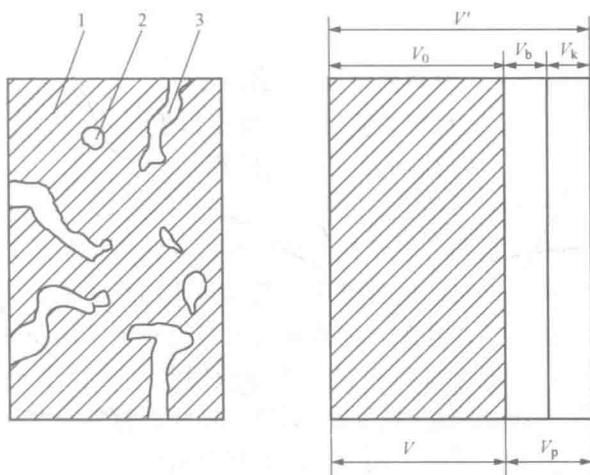


图 1-1 含孔材料组成示意图

1—固体物质; 2—闭口孔; 3—开口孔

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

式中 ρ ——材料的密度, kg/m^3 ;
 m ——材料的质量(干燥至恒重), kg ;
 V ——材料的绝对密实体积, m^3 。

密度的单位在 SI 制中为 kg/m^3 , 我国工程建设中一般用 g/cm^3 。材料的密度取决于物质的原子量与分子结构, 通常有机材料密度最小, 硅酸盐和铝酸盐居中, 而金属材料最大。

多孔材料的密度测定, 关键是测出绝对密实体积。除了玻璃、钢铁、沥青等少数材料可近似认为不含孔隙, 能直接测定其绝对密实体积外, 大多数材料在自然状态下或多或少含有孔隙, 一般先将材料粉碎磨细成粉状(粒径小于 0.20mm), 消除材料内部孔隙, 干燥后, 再用李氏瓶测定材料的绝对密实体积。材料粉磨得越细, 测定结果越准确。

另外, 工程上还经常用到相对密度, 是指材料的密度与 4°C 的纯水密度之比。

2. 表观密度 (bulk density)

表观密度是指单位表观体积材料的干质量, 也称为视密度、近似密度, 按式 (1-2) 计算, 即

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

式中 ρ_0 ——材料的表观密度, kg/m^3 ;
 V_0 ——材料的表观体积, m^3 。

通常, 材料在包含闭口孔隙条件下的体积(表观体积)是采用排液置换法或水中称重法测量。

3. 毛体积密度 (bulk density)

毛体积密度是指单位毛体积材料的干质量, 也称容积密度、重力密度、表观毛密度, 按式 (1-3) 计算, 即

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

式中 ρ' ——材料的毛体积密度, kg/m^3 ;
 V' ——材料的毛体积, m^3 。

材料毛体积密度可用量积法、水中称重法和蜡封法获得。量积法适用于具有规格形状的材料; 水中称重法适用于除遇水崩解、溶解和干缩湿胀外的其他材料; 蜡封法适用于不能用量积法或直接在水中称量进行试验的材料。

4. 堆积密度 (packing density)

散粒材料在堆积状态下单位堆积体积的质量, 称为材料的堆积密度, 按式 (1-4) 计算, 即

$$\rho_1 = \frac{m_1}{V_1} \quad (1-4)$$

式中 ρ_1 ——散粒材料的堆积密度, kg/m^3 ;
 m_1 ——散粒材料的质量, kg ;
 V_1 ——散粒材料的堆积体积, m^3 。

材料的堆积密度定义中未注明材料的含水状态, 有干堆积密度和湿堆积密度之分。根据

散粒材料的堆积状态,堆积体积又分为自然堆积体积和紧密堆积体积(人工捣实后)。由紧密堆积测得的堆积密度称为紧密堆积密度。

散粒材料的堆积密度可将散粒材料装入规定容积的容量筒来测定。

需要说明的是,《建筑用砂》(GB/T 14684—2011)及《建筑用卵石、碎石》(GB/T 14685—2011)中,表观密度以 ρ_0 表示,堆积密度以 ρ_1 表示。但在交通行业标准《公路工程骨料试验规程》(JTJ E42—2005)中,骨料表观密度以 ρ_a 表示,骨料毛体积密度以 ρ_b 表示,堆积密度以 ρ 表示。尽管表示符号有差异,但其定义与本教材是一致的。

常用土木工程材料的密度、表观密度和堆积密度见表1-1。

表1-1 常用土木工程材料的密度、表观密度和堆积密度

材料名称	密度(g/cm ³)	表观密度(kg/m ³)	堆积密度(kg/m ³)
石灰石	2.6~2.8	1800~2600	—
花岗石	2.7~3.0	2000~2850	—
水泥	2.8~3.1	—	900~1300 (松散堆积) 1400~1700 (紧密堆积)
混凝土用砂	2.5~2.6	—	1450~1650
混凝土用石	2.6~2.9	—	1400~1700
普通混凝土	—	2100~2500	—
黏土	2.5~2.7	—	1600~1800
钢材	7.85	7850	—
铝合金	2.7~2.9	2700~2900	—
烧结普通砖	2.5~2.7	1500~1800	—
建筑陶瓷	2.5~2.7	1800~2500	—
红松木	1.55~1.60	400~800	—
玻璃	2.45~2.55	2450~2550	—
泡沫塑料	—	10~50	—

1.2.3 材料的孔隙率和空隙率

1. 孔隙率与密实度

材料的孔隙率(porosity)是指材料中孔隙体积占材料自然状态下总体积的百分率。孔隙率 P 可按式(1-5)计算,即

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

密实度(compactness)是与孔隙率相对应的概念,指材料体积内被固体物质充实的程度,用符号 D 表示,按式(1-6)计算,即

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

材料孔隙率的大小直接反映了材料的致密程度。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