



普通高等教育“十二五”规划教材
国家级精品课配套教材

土木工程材料

吕 平

主 编

魏小胜 逢鲁峰
全洪珠 金祖权

副主编



科学出版社

普通高等教育“十二五”规划教材
国家级精品课配套教材

土木工程材料

吕 平	主 编
魏小胜 逢鲁峰	副主编
全洪珠 金祖权	

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以《高等学校土木工程专业本科指导性专业规范》为依据,介绍常用土木工程材料的组成与品种、技术性能与要求、检测标准与技术,以及本学科最新研究成果和进展等。内容包括绪论、基本性质、建筑钢材、无机胶凝材料、水泥混凝土及砂浆、墙体材料、沥青及沥青混合料、木材、建筑功能材料、土木工程材料新进展和附录。各章均设置了学习指导、历史回顾、工程案例与分析等板块,有助于学生对土木工程材料的理解以及创新能力的培养。

本书可作为土木工程、材料科学与工程、建筑学、建筑工程管理等本科专业的教学用书,也可作为建材、建筑工程等领域从事设计、科研、施工、管理等工作的科技人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

土木工程材料/吕平主编. —北京:科学出版社, 2015

(普通高等教育“十二五”规划教材 国家级精品课配套教材)

ISBN 978-7-03-045121-7

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

IV. ① TU5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 133706 号

责任编辑:任加林 / 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>

三河市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

*

2015 年 8 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015 年 8 月第一次印刷 印张:22

字数:495 000

定价:45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换 <铭浩>)

销售部电话:010-62134988 编辑部电话:010-62137026 (HA18)

版权所有, 侵权必究

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

作者简介



吕平博士、教授，1964 年出生，现任青岛理工大学土木工程学院研究生院院长，山东省有突出贡献的中青年专家、山东省教学名师、山东省省级创新团队负责人，国家精品资源共享课程、国家精品课程和国家双语示范课程负责人，兼任中国混凝土与水泥制品协会人力资源委员会常务理事、全国高等学校建筑材料学科研究会常务理事、山东省高校教学指导委员会委员、青岛理工大学学位委员会委员。

长期从事新型混凝土结构与理论，结构耐久性研究与防护技术，高性能涂敷材料与技术领域的理论研究和实践应用工作，积累了大量理论研究成果和实践经验。主持和参加国家自然科学基金项目、国家军工“863”项目、国家十五攻关引导项目、建设部科技攻关项目等国家级和省部级科研项目 20 余项，获得省部级以上教研及科研成果奖 20 余项。

前 言

本书以高等学校土木工程专业指导委员会制定的土木工程专业培养目标、培养规格以及课程设置方案为指导原则,土木工程专业指导委员会审定的“高等学校土木工程专业本科指导性专业规范”为依据,结合现阶段土木工程专业教学改革要求,参考现行最新国家标准和规范编写而成。

本书吸纳青岛理工大学“土木工程材料”国家资源共享课程和国家双语示范课程之精华,反映国内外课程体系、教学内容、教学方法和教学手段等方面改革最新研究成果和学科最新进展。将土木工程材料的基础性、系统性、先进性、技能性、前沿性和国际化融合于一体。注意强化专业基础,拓宽知识面,优化知识结构,满足厚基础、大专业的要求。本书增加土木工程材料新进展一章,介绍绿色建材、混凝土技术新进展及土木工程材料发展趋势等反映学科最新进展的内容,丰富了课程体系,培养学生的创新能力。每章均设置学习指导和工程案例与分析,培养学生独立思考、发现问题、解决问题的能力。

本书由国家资源共享课程和国家双语示范课程负责人吕平教授主编。

参加编写工作的还有华中科技大学魏小胜教授、山东建筑大学逢鲁峰教授和刘巧玲博士、青岛农业大学全洪珠教授和潘东芳博士、青岛理工大学金祖权教授、万小梅副教授、罗建林副教授和刘杏博士。

各章编写分工为:

绪论和第四章(第4.1至4.5节)由吕平(青岛理工大学)编写;

第一章由潘东芳(青岛农业大学)编写;

第二章由全洪珠(青岛农业大学)编写;

第三章由魏小胜(华中科技大学)编写;

第四章(第4.6节)由刘杏(青岛理工大学)编写;

第五章由逢鲁峰(山东建筑大学)编写;

第六章由刘巧玲(山东建筑大学)编写;

第七章由万小梅(青岛理工大学)编写;

第八章由罗建林(青岛理工大学)编写;

第九章和附录 由吕平(青岛理工大学)、金祖权(青岛理工大学)编写。

衷心感谢上述老师为本书所做的辛勤工作!

与本书配套的课程基本资源和课程拓展资源在爱课程网站面向全国资源共享(http://www.icourses.cn/coursestatic/course_2839.html),其中课程基本资源包括教学要求、知识点、重点难点、教学设计、评价考核、教材内容、知识点注释、教学录像、演示文稿、习题、试卷、教学课件、例题、电子教材(英文版)、实验/实训/实习等16个课程基本资源;拓展资

源包括中英文双语课程、技术前沿库、试验库、工程软件系统、土木工程材料师生互动平台等，欢迎广大读者在学习过程中参考使用。

由于编者水平所限，书中尚有不完善之处，敬请读者批评指正。

编 者

2014 年 12 月

于青岛

目 录

前言	
绪论	1
0.1 土木工程材料的含义与分类	1
0.2 材料与土木工程的关系	2
0.3 发展简史与趋势	2
0.4 本课程学习方法与要求	4
第一章 土木工程材料的基本性质	6
1.1 材料的物理性质	7
1.2 材料的力学性质	14
1.3 材料的耐久性与环境协调性	17
思考题	19
第二章 建筑金属材料	20
2.1 钢的冶炼及钢材的分类	20
2.2 建筑钢材的主要技术性能	23
2.3 钢材的组成、结构及其对性能的影响	29
2.4 钢材的冷加工强化与热处理	31
2.5 常用建筑钢材的性质与选用	33
2.6 钢材的腐蚀与防护	42
2.7 金属材料的发展动态	44
思考题	47
第三章 无机胶凝材料	48
3.1 石灰	49
3.2 建筑石膏	55
3.3 水泥	60
思考题	87
第四章 水泥混凝土及砂浆	89
4.1 水泥混凝土的特点及分类	90
4.2 水泥混凝土的组成材料	91
4.3 水泥混凝土的技术性质	111
4.4 水泥混凝土的质量控制	133
4.5 水泥混凝土的配合比设计	137
4.6 砂浆	150
思考题	159

第五章 墙体材料	161
5.1 砌墙砖	161
5.2 墙用砌块	170
5.3 墙用板材	174
5.4 新型墙体材料	175
思考题	176
第六章 沥青和沥青混合料	177
6.1 沥青	177
6.2 沥青混合料	186
思考题	232
第七章 木材	233
7.1 木材的分类与构造	233
7.2 木材的主要性质	235
7.3 木材的干燥、防腐与防火	240
7.4 木材的应用	242
思考题	246
第八章 建筑功能材料	247
8.1 建筑防水材料	247
8.2 建筑保温隔热材料	259
8.3 建筑吸声隔声材料	266
8.4 建筑防火材料	270
思考题	276
第九章 土木工程材料新进展	277
9.1 混凝土技术新进展	277
9.2 绿色新型土木工程材料及技术	299
9.3 土木工材料发展趋势	307
思考题	314
附录 常用材料试验简介	315
实验一 材料基本性质试验	316
实验二 水泥性质	319
实验三 混凝土骨料——砂	325
实验四 水泥混凝土	329
实验五 建筑钢材	336
实验六 沥青混合料	340
主要参考文献	343

绪 论

0.1 土木工程材料的含义与分类

0.1.1 含义

土木工程材料是指用于建筑工程中的所有材料的统称，包括直接构成建（构）筑物的材料（如水泥、混凝土、钢材等）、施工过程中所需要的辅助材料（如脚手架、横板等）和各种建筑器材（如消防、给排水设备等）。本书主要介绍直接构成建筑物的这部分材料。土木工程材料是一切土建工程的物质基础，由于组分、结构和构造的不同，土木工程材料种类繁多、性能与价格密切相关，且在土木工程中用量巨大。材料费一般占建筑物造价的 50%~60%，房屋 1m² 需要用 1~2t 工程材料，不同的材料具有不同的性能，如防水、防腐、保温隔热、隔声等，而不同的部位对土木工程材料性能要求不同，有的只需要单一性能优秀的土木工程材料，而有的则需要综合性能优异的土木工程材料，因此，正确选择并合理使用土木工程材料，对整个土木工程的安全、美观、耐久及经济实用等有重大意义。为此，必须掌握土木工程材料的组成、生产与工艺，结构、性能与应用，材料的品种与规格，性能与标准及实验测试方法等。

一般来说，土木工程材料应具有以下特点：

- （1）具备足够的强度，能够安全地承受设计荷载。
- （2）具有与使用环境相适应的耐久性，使建筑物具有较长使用寿命及低维修费用。
- （3）用于特殊部位的材料，应具有能满足使用要求的功能，如房屋的隔热、防水，楼板和内墙的隔声等，装饰材料能产生一定的艺术效果、美化建筑等。
- （4）无毒、无污染、无放射性等，能满足环保和人体健康的要求。
- （5）制造方便，物美价廉，使用范围广。

0.1.2 分类

土木工程材料种类繁多，按照化学成分，通常可以分为无机材料、有机材料和复合材料三大类，如表 0-1 所示。按材料来源，可分为天然材料及人造材料；按其使用性能，可分为承重结构材料、非承重结构材料及功能材料等；根据其功能，可分为结构材料、装饰材料和围护材料。

表 0-1 土木工程材料的分类

无机材料	金属材料	黑色金属	钢、铁、不锈钢等
		有色金属	铝、铜及其合金等
	非金属材料	天然石材	砂石料及石制品
		烧土制品	砖、瓦、玻璃、陶瓷等
		胶凝材料	石灰、石膏、水泥等
		硅酸盐制品	混凝土、砂浆及硅酸盐制品

续表

有机材料	植物材料	木材、竹材等
	沥青材料	石油沥青、煤沥青、沥青制品
	高分子材料	塑料、涂料、合成橡胶等
复合材料	非金属材料与非金属材料复合	水泥混凝土、砂浆等
	无机非金属材料与有机材料复合	玻璃纤维增强塑料、聚合物水泥混凝土、沥青混合料等
	金属材料与无机非金属材料复合	钢纤维增强混凝土等
	金属材料与有机材料复合	轻质金属夹芯板等

0.2 材料与土木工程的关系

土木工程材料是土木工程建设的重要物质基础,对土木工程的质量、造价以及土木工程技术具有重大的影响。

土木工程材料的品种、组成、构成、规格及使用方法等对土木工程的结构安全性、坚固耐久性和适用性等工程质量指标都有直接的影响。大量的工程实践表明,从材料选择、生产、使用、检验评定,到材料贮运、保存等环节都必须做到科学合理;否则任何环节的失误都可能造成工程的质量缺陷或酿成质量事故。

土木工程材料的选择、使用与管理是否合理对工程的经济性影响非常大。在一项工程中,采用不同的材料或不同的材料使用方法,可能达到的工程效果是一致或接近的,但是需要的成本或消耗的资源却有很大的差别。因此,要在确保质量的基础上达到最佳的经济性,就要求优化选择和正确使用材料,充分利用材料的各种功能,在满足工程使用要求的条件下,降低材料的资源或能源消耗,节约与材料有关的费用。从工程技术经济的角度来看,正确选择和使用材料,在土木工程建设工作中对于创造良好的经济效益与社会效益具有十分重要的意义。

土木工程材料品种、质量及规格,直接影响着各项建筑工程的坚固、耐久、适用、美观和经济性,并在一定程度上影响着工程结构的设计形式与施工方法。通常情况下,结构设计形式或设计方法的创新都必须以适应于充分发挥材料的性能为前提。工程中许多技术问题的突破,往往依赖于土木工程材料问题的解决;新的土木工程材料的出现,又将促进结构设计及施工技术的革新。因此,土木工程材料生产及其科学技术的迅速发展,对于工程技术的进步,具有重要的推动作用。

0.3 发展简史与趋势

0.3.1 发展简史

土木工程材料是人类物质文明的重要标志,它反映各个时代的科学文化特征,也是社会生产力发展水平的标志。土木工程材料按照其发展历史可分为以下三个阶段。

(1) 古代土木工程材料。土木工程材料随着社会生产力和科学技术水平的发展而发展的。人类最早穴居巢处,随着社会生产力的发展,人类社会进入石器时代、青铜器时代、铁器时代,才开始挖土、凿石为洞,伐木、搭竹为棚,利用天然材料建造非常简陋的土木工程,公

元前 12 世纪~公元前 4 世纪前后, 砖、瓦、石灰、石膏等材料相继出现, 17 世纪生铁和熟铁得到了应用。这些土木工程材料的出现, 标志土木工程材料由天然材料进入人工生产阶段, 且为较大规模的土木工程建设创造了基本条件。在这期间, 人类使用石材、石灰、石膏等人工生产的土木工程材料, 制造了许多壮观的建筑, 如金字塔、万里长城、布达拉宫、古罗马斗兽场等古代建筑, 令世人惊叹不已。

(2) 近代土木工程材料。18~19 世纪, 在工业革命的带动下, 工商业和交通运输业蓬勃发展, 原有土木工程材料已经不能满足社会需求, 在其他科学技术的推动下, 土木工程材料进入一个新的发展时期, 钢铁、水泥和混凝土及其他材料相继问世, 为现代土木工程材料的发展奠定了基础。

(3) 现代土木工程材料。进入 20 世纪后, 社会生产力的突飞猛进和高新科学技术的进步, 以及材料科学与工程学的形成和发展, 使得土木工程材料的性能和质量不断改善, 且品种数不断增加, 以有机材料为主的化学建材异军突起, 一些具有特殊功能的新型复合土木工程材料, 如绝热材料, 吸声隔声材料, 装饰材料, 耐热防火材料, 防水抗渗材料, 耐磨、耐腐蚀材料, 防爆、防辐射材料等应运而生。土、石等土木工程材料仍在基础工程中广泛被使用, 砖瓦、木材等传统材料在工程的某些方面的应用也很普遍, 但是这些应用材料的主导地位已逐渐被新型材料所取代。目前, 水泥混凝土、钢材、钢筋混凝土已是不可替代的结构材料; 新型合金、陶瓷、玻璃、有机材料及其他人工合成材料、各种复合材料等在土木工程中占有非常重要的位置。

0.3.2 发展趋势

随着现代化建设的发展, 人类要求现代化的土木工程具有更高的安全性、舒适性、美观性、节能、耐久性及经济实用性。特别是基于新型土木工程材料的自重轻、抗震性能好、能耗低、材料循环利用等优点, 研究开发和应用新型土木工程材料已成必然。遵循可持续发展战略, 土木工程材料呈现以下发展趋势:

(1) 多功能、高性能化。例如, 研制轻质、高强、高耐久性、优异装饰性和多功能的材料, 以及充分利用和发挥各种材料的特性, 采用复合技术, 制造出具有特殊功能的复合材料。

(2) 再生利用。充分利用地方材料, 尽量使用减少天然资源, 大量使用尾矿、废渣、垃圾等废弃物作为生产土木工程材料的资源, 以及保护自然资源和维护生态环境的平衡; 实现产品可循环再生和回收利用, 无污染废弃物, 以防止二次污染。

(3) 节约能源。采用低能耗、无环境污染的生产技术, 优先开发、生产低能耗的材料以及能降低建筑物使用能耗的节能型材料。

(4) 绿色环保。材料生产中不使用有损人体健康的添加剂和颜料, 如甲醛、铅、镉、铬及其化合物等, 同时开发对人体有益的材料, 如抗菌、灭菌、除臭、除霉、防火、调温、消磁、防辐射、抗静电等。

(5) 智能化。即要求土木工程材料具有自感知、自调节、自修复的功能。目前, 如具有自清洁、裂缝自修复功能的智能土木工程材料已经在土木工程中得到很好的应用。

0.4 本课程学习方法与要求

各种土木工程材料在原材料、生产工艺、结构及构造、性能及应用、检验及验收、运输及储存等方面既有共性，也有各自的特点，因此，全面掌握土木工程材料的知识，需要学习和研究的内容范围很广。对于从事土木工程设计、施工、科研和管理的专业人员而言，掌握各种土木工程材料的性能及其适用范围以及如何选择最合适的土木工程材料最为重要。除了在施工现场直接配制或加工的材料（如腻子、混凝土、金属焊接等）需要深入学习其原材料、生产工艺以及它们与材料的结构和性能的关系外，对于以产品形式直接在施工现场使用的材料，也需要了解其原材料、生产工艺及结构、构造的一般知识，以了解这些因素对材料性能的影响及如何产生影响。

作为有关生产、设计应用、管理和研究等部门应共同遵循的依据，对于绝大多数常用土木工程材料，均由专门的机构制定并发布相应的“技术标准”对其质量、规格和验收方法等作了详尽而明确的规定。在我国，技术标准分为四级：国家标准、行业标准、地方标准和企业标准。国家标准是由国家质量监督检验检疫总局发布的全国性指导技术文件，其代号为 GB。行业标准也是全国性的指导技术文件，但它由主管生产部门（或总局）发布，其代号按部名而定。例如，建材行业标准，其代号为 JC；建工行业标准，其代号为 JG；交通行业标准，其代号为 JT；其他行业标准还有铁道部标准（TB）、冶金行业标准（YB）、石化行业标准（SH）、林业行业标准（LY）。地方标准是地方主管部门发布的地方性指导技术文件，其代号为 DB。企业标准仅适用于本企业，其代号为 QB。凡没有制定国家标准、行业标准的产品，均应制定相应的企业标准。随着我国对外开放和加入世界贸易组织（WTO），常常涉及一些与土木工程材料关系密切的国际、国外标准，如国际标准（ISO）、美国材料试验标准（ASTM）等。熟悉有关的技术标准，并了解制订标准的科学依据，也是十分必要的。

土木工程材料课程是土木工程专业的专业技术基础课，通过该课程内容的学习，能为学习后续的结构设计、工程施工、经济管理等方面的专业课程，以及为从事相关专业技术工作打下基础。该课程涵盖了包括钢材、胶凝材料、混凝土、砂浆、墙体材料、木材、沥青等在内的多种土木工程中常用材料，主要讨论了上述材料的原料与生产，组成、结构与性质的关系，性质与应用，技术要求与检验，未来发展等方面的内容。根据该课程的特点与要求，在学习上要重视对土木工程材料基本性质的掌握与应用，了解当前土木工程中常用材料的组成、结构及其形成机理，熟悉这些材料的主要性能与正确的使用方法，以及这些材料技术性能指标的试验检测和质量评定方法；通过学习分析与评定材料的方法，掌握解决工程实际中有关材料问题的一般规律，以便在将来的工作中能够正确认识和使用新的材料。

本课程具有内容繁多、涉及面广、实践性强等特点，学生们在初学时正确理解与全面掌握这些知识的难度较大。因此，在学习过程中，首先应在掌握材料基本性质和相关理论的基础上，再熟悉常用材料的主要性能、技术标准及应用方法，并结合工程案例灵活运用所学知识和试验、测试手段。为了帮助学生更快地达到上述目的，本书在每章前面设置了“学习指导”和“历史回顾”，在大部分章节主体内容中设置了“工程案例与分析”。其中，“学习指导”明确了学生学习时应了解、熟悉、掌握材料的相关内容，“历史回顾”简单概述了该章所介绍材料的历史起源和发展。通过“学习目标”和“历史回顾”的学习，有助于理清学

习思路并提升学习兴趣。“案例分析”从实际工程案例出发提出与所学知识有关的问题，有助于加深学生们对所学知识的理解并提升理论联系实际的能力。

本课程是一门以生产实践和科学实验为基础的学科，因而实验课是本课程的重要教学环节。实验课的任务是验证基本理论，加深对课本知识的了解，学习试验方法和技术，培养动手能力、科学研究能力和严谨的科学态度。本课程的实验是根据课程的重点、难点和土木工程材料的发展趋势所设计的，由基本实验和开放实验组成，要求学生们在老师的指导下完全掌握并独立完成。做实验时必须严肃认真，应特别了解实验条件对实验结果的影响，并对实验结果做出正确的分析和判断。

与本书配套的本课程教学资源分为课程基本资源和课程拓展资源两大部分。课程基本资源包括教学要求、知识点、重点难点、教学设计、评价考核、教材内容、知识点注释、教学录像、演示文稿、习题作业、试卷、教学课件、例题、电子教材（英文版）、实验/实训/实习等 16 个课程基本资源，而且还包括土木工程材料中英文双语课程、技术前沿库、试验库、工程软件系统、土木工程材料师生互动平台等课程拓展资源。鉴于编者负责国家精品资源共享课程“土木工程材料”的建设，上述课程教学资源面向全国资源共享。

第一章 土木工程材料的基本性质

【学习指导】

本章内容共3节，其学习目标是：

- (1) 掌握土木工程材料的基本物理性质。
- (2) 熟练掌握土木工程材料的基本力学性质。
- (3) 了解土木工程材料的耐久性和环境协调性。

建议通过学习了解材料科学的基本概念，理解材料的组成结构与性能的关系，以及在工程实践中的意义。

【历史回顾】

我国城墙最早大约出现在新石器时代中期，随着城市的不断增加而被大量建造，其建造材料也不断发生改进。原始社会城墙选材粗糙，坚固性差。到原始社会晚期，城墙使用的夯土已相当纯净，大多为黄砂土或黄色、灰色胶泥。而东晋时北方十六国之一的夏都统万城在修建中使用了糯米灰浆和“三合土”（石灰、黄土和沙子），所筑城墙十分坚固。西安明城墙采用细筛黄土、米浆和细沙夯筑而成，再在城楼等重点部位以青砖包砌，历经五百余年仍然保存完好。古代城市尤其是边城的城墙建造历来有因地制宜、就地取材的做法。如甘肃敦煌一带的汉代边墙就采用红柳、芦苇作为框架，并填以砂石构筑而成。每一座城墙都是古代劳动人民的辛勤成果，也体现了当时的土木工程科技水平。

应用于建筑物或构筑物的材料，在使用过程中会受到各种作用。当材料使用的结构形式或工程部位不同时，对材料性能的要求也有所不同。如一般房屋建筑用钢材主要考虑强度，但用于桥梁的钢材还要重点考虑其抵抗冲击荷载的能力；用于屋面、外墙的材料，会受到风、霜、雨、雪和阳光的作用；有些材料还会受到生物的腐蚀，如木材的腐朽。因此，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，尤其是在新材料不断出现的今天，学习材料的一些基本知识就显得更加重要。只有熟悉和掌握各种土木工程材料技术性质的特点，综合考虑材料各方面的性质，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。

如何提高土木工程材料的使用效果，延长其使用年限，关键在于掌握材料的基本性质。因此，本章介绍材料的一些共性性质和土木工程材料特有的一些性质。对新材料的开发和材料使用过程中各种行为的认识，除掌握材料性质外，还应了解相关理论知识，因此本章还将从材料学角度介绍一些相关基础理论与知识，有关材料性质的介绍也力求深入。

1.1 材料的物理性质

1.1.1 密度、表观密度、体积密度和堆积密度

1. 密度

密度是指材料在绝对密实状态下单位体积的质量。按下式计算

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.1)$$

式中: ρ —— 材料的密度, kg/m^3 或 g/cm^3 ;

m —— 材料的质量 (干燥至恒量), kg 或 g ;

V —— 材料在绝对密实状态下的体积, m^3 或 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 0.25mm 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”。从理论上来说, 材料磨得越细, 所测密实体积越精确。

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

2. 表观密度

表观密度是指单位体积 (含材料实体及闭口孔隙体积) 材料的干质量, 也称视密度, 计算为

$$\rho_0 = \frac{m}{V_0} \quad (1.2)$$

式中: ρ_0 —— 材料的表观密度, kg/m^3 或 g/m^3 ;

m —— 材料的质量干燥到恒重, kg 或 g ;

V_0 —— 材料在包含闭口孔隙条件下的体积 (即只含内部闭口孔, 不含开口孔), 如图 1.1 所示, m^3 或 cm^3 。

通常, 材料在包含闭口孔隙条件下的体积采用排液置换法或水中称重法测量。

3. 体积密度

体积密度是指材料在自然状态下单位体积 (包括材料实体及其开口孔隙、闭口孔隙) 的质量, 俗称容重。体积密度可按式 (1.3) 计算。

$$\rho' = \frac{m}{V'} \quad (1.3)$$

式中: ρ' —— 材料的体积密度, kg/m^3 或 g/m^3 ;

m —— 材料的质量, 按有关标准规定, 该质量是指自然状态下的气干质量, 即将试件置于通风良好的室内存放 7 天后测得的质量, kg 或 g ;

V' —— 材料在自然状态下的体积, 包括材料实体及内部孔隙 (开口孔隙和闭口孔隙), 如图 1.1 所示, m^3 或 cm^3 。

对于规则形状材料的体积,可用量具测得。例如,加气混凝土砌块的体积是逐块量取长、宽、高三个方向的轴线尺寸,计算其体积。对于不规则形状材料的体积,可用排液法或封蜡排液法测得。

毛体积密度是指单位体积(含材料的实体成分及其闭口孔隙、开口孔隙等物质材料表面轮廓线所包围的毛体积)材料的干质量。因其质量是指试件烘干后的质量,故也称干体积密度。

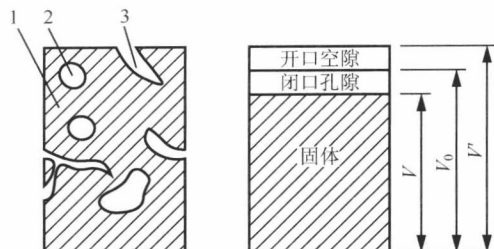


图 1.1 材料体积示意图

1—固体; 2—闭口孔隙; 3—开口孔隙

4. 堆积密度

堆积密度是指散粒状材料单位堆积体积(含物质颗粒固体及其闭口、开口孔隙体积及颗粒间空隙体积)物质颗粒的质量,有干堆积密度及湿堆积密度之分。堆积密度可按式(1.4)计算。

$$\rho_1 = \frac{m}{V_1} \quad (1.4)$$

式中: ρ_1 ——材料的堆积密度, kg/m^3 ;

m ——材料的质量, kg ;

V_1 ——材料的堆积体积, m^3 。

材料的堆积体积包括材料绝对体积、内部所有孔体积和颗粒间的空隙体积。材料的堆积密度反映散粒结构材料堆积的紧密程度及材料可能的堆放空间。

需要说明的是,《建筑用砂》(GB/T 14684—2001)及《建筑用卵石、碎石》(GB/T 14685—2001)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《公路工程集料试验规程》(JTJ 058—2000)中,集料表观密度以 ρ_a 表示,集料毛体积密度以 ρ_0 表示。尽管表示符号有差异,但其定义与本书是一致的。

常用建筑材料的密度、表观密度和堆积密度如表 1-1 所示。

表 1-1 常用建筑材料的密度、表现密度与堆积密度

材料	密度/(g/cm^3)	表观密度/(kg/m^3)	堆积密度/(kg/m^3)
石灰岩	2.60	1800~2600	—
花岗岩	2.60~2.80	2500~2700	—
碎石(石灰岩)	2.60	—	1400~1700
砂	2.60	—	1450~1650

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	2.60	—	1600~1800
普通黏土砖	2.50~2.80	1600~1800	—
黏土空心砖	2.50	1000~1400	—
水泥	3.10	—	1200~1300
普通混凝土	—	2100~2600	—
钢材	7.85	7850	—
木材	1.55	400~800	—
泡沫塑料	—	20~50	—

1.1.2 孔隙率和空隙率

1. 孔隙率与密实度

材料的孔隙率是指材料中的孔隙体积占材料自然状态下总体积的百分率，它以 P 表示。孔隙率计算为

$$P = \frac{V' - V}{V'} \times 100\% = \left(1 - \frac{\rho'}{\rho}\right) \times 100\% \quad (1.5)$$

密实度是与孔隙率相对应的概念，指材料体积内被固体物质充实的程度，用符号 D 表示，计算为

$$D = \frac{V}{V'} \times 100\% = \frac{\rho'}{\rho} \times 100\% \quad (1.6)$$

孔隙率的大小直接反映材料的致密程度。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大小有关，而且与材料的孔隙特征有关。孔隙特征是指孔的种类（开口孔与闭口孔）、孔径的大小及孔的分布是否均匀等。

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

$$P_k = \frac{V_k}{V'} \times 100\% \quad (1.7)$$

$$P_b = P - P_k \quad (1.8)$$

式中： V_k ——开口孔的体积。

2. 空隙率与填充率

材料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（开口孔隙与间隙之和）占堆积体积的百分率，它以符号 P' 表示。空隙率可按式（1.9）计算。

$$P' = \frac{V_1 - V_0}{V_1} \times 100\% = \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_0}\right) \times 100\% \quad (1.9)$$

空隙率的大小反映散粒材料的颗粒互相填充的致密程度。当计算混凝土中粗集料空隙率时，由于混凝土拌和物中的水泥浆能进入石子的开口孔内，开口孔体积也算空隙体积的一