

普通高等教育规划教材

# 土木工程材料

◎ 主编 陈德鹏

◎ 主审 张云升



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育规划教材

# 土木工程材料

|     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|
| 主 编 | 陈德鹏 |     |     |
| 副主编 | 杨新磊 | 巴明芳 | 吕 忠 |
| 参 编 | 陈 登 | 邓初首 | 刘纯林 |
|     | 武 萍 | 吴 旻 | 荣 辉 |
| 主 审 | 张云升 |     |     |



机械工业出版社

本书以材料在当代土木工程中的应用为背景,结合土木建筑工程领域技术发展和人才培养的需求,根据全国高等学校土木工程学科专业指导委员会制定颁布的《高等学校土木工程本科指导性专业规范》以及高等学校工程管理和工程造价学科专业指导委员会制定的《高等学校工程管理本科指导性专业规范》编写而成。本书内容全面,涉及土木工程材料的基本性质、无机气硬性胶凝材料、无机水硬性胶凝材料、混凝土、建筑砂浆、建筑金属材料、木材、沥青与沥青混合料、墙体材料和屋面材料、土工合成材料、建筑功能材料、土木工程材料试验等。

本书可作为土木工程、工程管理、工程造价、建筑学等专业及其他相近专业的教学用书,也可供从事设计、施工和管理等工作的技术人员学习参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

土木工程材料/陈德鹏主编. —北京:机械工业出版社,2017.9

普通高等教育规划教材

ISBN 978-7-111-58029-4

I. ①土… II. ①陈… 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(2017)第227456号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:林辉 责任编辑:林辉 责任校对:张征 张薇

封面设计:马精明 责任印制:李昂

河北鹏盛贤印刷有限公司印刷

2018年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·19.5印张·538千字

标准书号:ISBN 978-7-111-58029-4

定价:45.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com



## PREFACE

本书根据《高等学校土木工程本科指导性专业规范》《高等学校工程管理本科指导性专业规范》，围绕专业规范要求的土木工程材料科学基础知识领域、核心知识单元和知识点编写而成，力图全面反映土木工程材料及其应用技术的发展现状与趋势，最新标准、规范和规程，并充分考虑土木工程材料课程与先修课程和后续课程的衔接，以满足土木建筑类相关专业对土木工程材料课程的教学要求。

本书内容全面，系统介绍了土木工程建设中常用的与混凝土、建筑钢材、水泥、沥青及沥青混合料、建筑砂浆、墙体与屋面材料、土工合成材料、建筑功能材料、木材等材料性能相关的基本知识、工程应用及工程质量检验等，可作为高等学校土木工程、工程管理、工程造价、建筑学及其他相关专业的教学用书，也可供从事设计、施工和管理等工作的技术人员学习参考。本书配套 PPT 课件及相关学习资源，读者可登录机工教育服务网下载，或致电书后“服务咨询热线”索取。

本书由安徽工业大学陈德鹏担任主编，天津城建大学杨新磊、宁波大学巴明芳和安徽工业大学吕忠担任副主编。参与编写的还有苏州科技大学陈登，安徽工业大学邓初首、刘纯林、武萍、吴旻，天津城建大学荣辉等。本书编写分工如下：陈德鹏编写第 1 章、第 2 章第 5.6、5.7 节，杨新磊编写第 7 章，巴明芳编写第 3 章、第 4.1 至第 4.3 节，吕忠编写第 10 章，第 5.1 至第 5.5 节，陈登编写第 6 章，第 4.4~4.6 节，邓初首编写第 13 章，刘纯林编写第 8 章，第 11 章，武萍编写第 12 章，吴旻编写第 9 章，荣辉编写第 5.8 节。全书由陈德鹏统稿。

本书邀请东南大学张云升教授担任主审，张云升教授对本教材提出了许多宝贵的审稿意见，在此特向他表示衷心的感谢。感谢王新霞对本书的编辑加工，感谢机械工业出版社林辉对本书的编辑整理及修改完善。本书在编写过程中参考了许多文献，在此对它们的作者表示感谢。由于编者水平有限，书中难免有不当之处，敬请广大专家和读者批评指正。

编 者



# 录

## CONTENTS

---

### 前 言

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....           | 1  |
| 本章提要 .....               | 1  |
| 1.1 土木工程材料的重要作用 .....    | 1  |
| 1.2 土木工程材料的分类 .....      | 2  |
| 1.3 土木工程材料的发展趋势 .....    | 2  |
| 1.4 土木工程材料的技术标准 .....    | 3  |
| 1.5 土木工程材料课程的性质与任务 ..... | 6  |
| 思考题与习题 .....             | 6  |
| 第 2 章 土木工程材料的基本性质 .....  | 7  |
| 本章提要 .....               | 7  |
| 2.1 材料的基本物理性质 .....      | 7  |
| 2.2 材料的力学性质 .....        | 15 |
| 2.3 材料的耐久性与环境协调性 .....   | 18 |
| 2.4 材料的组成、结构与构造 .....    | 20 |
| 思考题与习题 .....             | 21 |
| 第 3 章 无机气硬性胶凝材料 .....    | 23 |
| 本章提要 .....               | 23 |
| 3.1 石灰 .....             | 23 |
| 3.2 石膏 .....             | 27 |
| 3.3 水玻璃 .....            | 31 |
| 3.4 镁质胶凝材料 .....         | 32 |
| 思考题与习题 .....             | 34 |
| 第 4 章 无机水硬性胶凝材料 .....    | 35 |
| 本章提要 .....               | 35 |
| 4.1 通用硅酸盐水泥 .....        | 35 |
| 4.2 其他品种的硅酸盐水泥 .....     | 51 |
| 4.3 铝酸盐水泥 .....          | 55 |
| 4.4 硫铝酸盐水泥 .....         | 57 |
| 4.5 其他品种水泥 .....         | 58 |

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| 4.6 新型胶凝材料及其在土木工程中的应用 .....    | 58         |
| 思考题与习题 .....                   | 63         |
| <b>第5章 混凝土</b> .....           | <b>65</b>  |
| 本章提要 .....                     | 65         |
| 5.1 概述 .....                   | 65         |
| 5.2 普通混凝土的基本组成材料 .....         | 67         |
| 5.3 外加剂与掺合料 .....              | 74         |
| 5.4 普通混凝土拌合物的性能 .....          | 81         |
| 5.5 普通混凝土硬化后的性能 .....          | 86         |
| 5.6 普通混凝土配合比设计 .....           | 99         |
| 5.7 普通混凝土的质量控制与强度评定 .....      | 109        |
| 5.8 其他种类混凝土及现代混凝土技术进展 .....    | 120        |
| 思考题与习题 .....                   | 133        |
| <b>第6章 建筑砂浆</b> .....          | <b>138</b> |
| 本章提要 .....                     | 138        |
| 6.1 建筑砂浆的组成材料 .....            | 138        |
| 6.2 砂浆的技术要求 .....              | 139        |
| 6.3 砌筑砂浆的配合比设计 .....           | 141        |
| 6.4 其他砂浆 .....                 | 143        |
| 思考题与习题 .....                   | 148        |
| <b>第7章 建筑金属材料</b> .....        | <b>149</b> |
| 本章提要 .....                     | 149        |
| 7.1 钢材的冶炼和分类 .....             | 149        |
| 7.2 建筑钢材的主要技术性能 .....          | 151        |
| 7.3 钢材的组织 and 化学成分对性能的影响 ..... | 156        |
| 7.4 钢材的冷加工与热处理 .....           | 158        |
| 7.5 土木工程用钢材的技术标准及选用 .....      | 160        |
| 7.6 钢材的锈蚀与防护 .....             | 169        |
| 7.7 其他建筑金属材料 .....             | 171        |
| 思考题与习题 .....                   | 173        |
| <b>第8章 木材</b> .....            | <b>175</b> |
| 本章提要 .....                     | 175        |
| 8.1 木材的分类和构造 .....             | 175        |
| 8.2 木材的主要性质 .....              | 176        |
| 8.3 木材的防护 .....                | 179        |
| 8.4 木材的应用 .....                | 180        |
| 思考题与习题 .....                   | 182        |
| <b>第9章 沥青与沥青混合料</b> .....      | <b>183</b> |
| 本章提要 .....                     | 183        |
| 9.1 沥青材料 .....                 | 183        |
| 9.2 沥青基防水材料 .....              | 190        |
| 9.3 沥青混合料 .....                | 194        |
| 思考题与习题 .....                   | 205        |

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| <b>第 10 章 墙体材料和屋面材料</b> | 206 |
| 本章提要                    | 206 |
| 10.1 砌筑石材               | 206 |
| 10.2 墙用块材、板材及新型墙体材料     | 209 |
| 10.3 屋面材料               | 223 |
| 思考题与习题                  | 224 |
| <b>第 11 章 土工合成材料</b>    | 226 |
| 本章提要                    | 226 |
| 11.1 土工合成材料发展简史         | 226 |
| 11.2 土工合成材料的种类          | 227 |
| 11.3 土工合成材料的性能          | 229 |
| 11.4 土工合成材料的功能及工程选用     | 234 |
| 思考题与习题                  | 237 |
| <b>第 12 章 建筑功能材料</b>    | 238 |
| 本章提要                    | 238 |
| 12.1 建筑防水材料             | 238 |
| 12.2 建筑绝热材料             | 244 |
| 12.3 建筑吸声隔声材料           | 249 |
| 12.4 建筑防火材料             | 252 |
| 12.5 建筑装饰材料             | 256 |
| 思考题与习题                  | 263 |
| <b>第 13 章 土木工程材料试验</b>  | 266 |
| 本章提要                    | 266 |
| 13.1 土木工程材料的基本性质试验      | 266 |
| 13.2 水泥试验               | 270 |
| 13.3 建筑钢筋试验             | 279 |
| 13.4 混凝土用集料试验           | 283 |
| 13.5 普通混凝土试验            | 289 |
| 13.6 沥青及沥青混合料试验         | 295 |
| <b>参考文献</b>             | 305 |

# 第 1 章

## 绪 论

### 本章提要

本章主要介绍土木工程材料在工程建设中的重要地位、分类、未来发展趋势及技术标准等。本章教学重点是土木工程材料的分类及发展趋势、技术标准及表示方法等；难点在于如何使学生充分认识到课程重要性并理解土木工程材料在工程建设及土木工程科技发展中的重要作用。通过本章学习，学生应掌握土木工程材料的分类，了解土木工程材料在工程建设中的重要地位及发展趋势。

各行业、各类建设项目无一例外都是从土木工程基本建设开始的，任何一种建筑物或构筑物，包括房屋、道路、桥梁、隧道、大坝、港口和矿井等土木工程，都是用各种材料按照一定要求建成的。通常把土木工程建设中所使用的各种材料及其制品统称为土木工程材料，它既是土木工程建设的物质基础，也是土木工程建设的物质基础与保证，在土木工程建设中具有重要地位。

### 1.1 土木工程材料的重要作用

土木工程建设过程就是通过建筑、结构、建造和经济工程师的努力和智慧，将土木工程材料进行有机结合而形成各类建（构）筑物的过程。工程建设中，土木工程材料的生产、选择使用、检验评定以及储存、保管等任何环节的失误都可能造成工程的质量缺陷，甚至导致重大质量事故。因此，合格的土木工程技术人员必须熟练掌握土木工程材料的有关知识。

土木工程材料由于用量大，成为土木工程造价诸多构成因素中的主要因素，材料费用通常在工程总造价占 50%~60% 的较大比例，直接关系工程建设的造价与成本，影响工程建设的经济性。工程建设时需要在满足材料各项性能的基础上最大限度地节约和合理使用材料，降低工程造价和建设投资，这需要合理选择和正确使用土木工程材料，充分利用材料的各种功能，并结合运输、储存及管理过程统筹考虑加以实现。因此，为实现工程建设的技术经济性也需要掌握土木工程材料的有关知识。

土木工程技术的发展进步，很大程度上取决于新型土木工程材料的研发与应用以及传统土木工程材料的性能改进与完善，是决定土木建筑工程结构设计形式和施工技术的主要因素。土木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，新材料的出现，将促使建筑设计、结构设计和施工技术革命性的变化。例如，水泥和钢筋的出现，产生了钢筋混凝土结构；轻质高强材料的出现，推动了现代建筑向高层和大跨度方向发展；轻质材料和保温材料的出现对减轻建筑物的自重、提高建筑物的抗震能力、改善工作与居住环境条件等起到了十分有益的作用，并推动了节能建筑的发展；新型装饰材料的出现使得建筑物的造型及建筑物的内外装饰焕然一新，生气勃勃。新材料的出现远比通过结构设计与计算和采用先进施工技术对土木工程的影响大，土木工程归根到底是围绕着土木工程材料来开展的生产活动，是以土木工程材料为基础和核心的。

## 1.2 土木工程材料的分类

广义范畴的土木工程材料是指用于土木工程的所有材料，可包括三部分：

- 1) 构成建（构）筑物实体的材料，如水泥、石灰、混凝土、钢材、砖、砌块、石材、沥青、瓷砖及其他装饰材料、功能材料等。
- 2) 辅助发挥作用的建筑器材，如给水排水设备、消防设备、网络通信设备材料等。
- 3) 施工过程中的辅助材料及临时设施，如脚手架、模板、围墙、板桩等。

狭义范畴的土木工程材料是指直接构成土木工程实体的材料，本书内容主要关注狭义范畴的土木工程材料。

土木工程材料种类繁多，根据不同的依据可以进行多种方法的分类。按照工程性质，土木工程材料可分为建筑工程材料、道路桥梁工程材料、岩土工程材料等；按照材料来源，可分为天然材料和人工材料。最为常用的分类方法是根据材料的化学成分和物质组成的分类，据此可分为无机材料、有机材料和复合材料三大类，详见表 1-1。此外，按照使用功能和工程部位，可分为结构材料、墙体材料和功能材料等，见表 1-2。

表 1-1 土木工程材料分类（按化学成分）

| 分类   |                |          | 材料举例                     |
|------|----------------|----------|--------------------------|
| 无机材料 | 金属材料           | 黑色金属     | 钢、铁、不锈钢、合金钢等             |
|      |                | 有色金属     | 铜、铝及其合金等                 |
|      | 非金属材料          | 天然石材     | 砂、石及石材制品等                |
|      |                | 烧土制品     | 砖、瓦、陶瓷制品等                |
|      |                | 胶凝材料及其制品 | 石灰、石膏及其制品、水泥及混凝土制品       |
|      |                | 玻璃       | 普通平板玻璃、特种玻璃等             |
| 有机材料 | 无机纤维           |          | 玻璃纤维、玄武岩纤维、矿物棉等          |
|      | 植物材料           |          | 木材、竹材、植物纤维及制品等           |
|      | 沥青材料           |          | 石油沥青、煤沥青即沥青制品等           |
| 复合材料 | 合成高分子材料        |          | 塑料、涂料、胶黏剂、合成橡胶等          |
|      | 无机非金属与有机材料复合   |          | 聚合物混凝土、沥青混合料、玻璃钢等        |
|      | 金属材料与无机非金属材料复合 |          | 钢筋混凝土、钢纤维混凝土、钢管混凝土等      |
|      | 金属材料与有机材料复合    |          | PVC 钢板、有机涂层铝合金板、轻质金属夹芯板等 |

表 1-2 土木工程材料分类（按部位和功能）

| 分类                    | 材料举例                                     |
|-----------------------|------------------------------------------|
| 结构材料(建筑物受力构件和结构所用的材料) | 水泥、砂、石、普通混凝土、钢筋混凝土、预应力混凝土、钢管混凝土、钢、轻钢、铝合金 |
| 墙体材料(建筑物内外及隔墙墙体所用的材料) | 砌墙砖、各类砌块、轻质墙板、复合墙体                       |
| 功能材料(发挥某些建筑功能的非承重材料)  | 防水材料、保温隔热材料、吸声隔声材料、装饰装修材料                |

## 1.3 土木工程材料的发展趋势

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，大致经历了天然材料、烧土制品和钢筋混凝土的三个发展阶段。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）等。

有限的地球物质资源和人类持续发展的需求，对土木工程材料提出了更高、更多的要求，

为适应建筑工业化、环境保护和多功能化等的要求。今后一段时间内,土木工程材料将向以下几个方向发展:

(1) 轻质高强 发展轻质高强材料,以减轻建筑物自重,可解除自重对结构高度和宽度的限制;也可降低材料用量、降低运费和劳动强度,提高经济效益。当前世界各国都在大力发展高强混凝土、加气混凝土、轻集料混凝土、空心砖、石膏板等材料,以满足土木工程发展的需要。

(2) 多功能化 发展多功能材料,使材料具有两种或两种以上的更多功能,可以在节约材料的同时实现多种功能;也可减少材料用量,简化构造层次和施工工艺。当前可以利用复合技术生产多功能材料、特殊性能材料及高性能材料,提高建筑物的使用功能和经济性。

(3) 智能化 所谓智能化材料,是指模仿生命系统,使材料本身具有自感知、自反馈、自调节、自诊断或自修复能力。智能化材料具有传统材料无法比拟的优越性,已逐渐成为全球研究和开发的热点。当前已有的自调光玻璃、自愈合混凝土、相变储能建筑材料等都已具备智能化的特点。智能化建筑材料、智能化建筑业逐渐成为现代建筑的主要趋势。

(4) 绿色化 土木工程材料的绿色化,又可称为生态化,是为了降低环境污染、节约资源、维护生态平衡而生产的节能型、环保型和保健型的土木工程材料,即通常所谓的绿色建筑材料。

绿色建筑材料是指采用清洁生产技术,不用或少用天然资源和能源,大量使用工农业或城市固体废物生产的无毒害、无污染、无放射性,达到使用周期后可回收利用,有利于环境保护和人体健康的建筑材料。绿色建筑材料的界定不能仅限于某个阶段,而必须采用涉及多因素、多属性和多维的系统方法,必须综合考虑建筑材料的生命周期全过程的各个阶段。

(5) 工业规模化 为适应社会经济现代化和土木工程建设的需要,土木工程材料的生产要实现工业化和规模化,这样便于降低成本、控制质量和机械化施工。土木工程材料的工业规模化可通过生产标准化、大型化、商品化等途径实现。

## 1.4 土木工程材料的技术标准

土木工程材料技术标准是有关材料研究、生产、使用和管理等部门应该共同遵循的工作依据。目前我国绝大多数土木工程材料都有相应的技术标准(有产品标准和实验标准之分),对其产品规格、分类、技术要求、检验方法、验收规则、运输与储存等进行了明确规定。目前我国的技术标准分为四级,即国家标准、行业标准、地方标准和企业标准。

国家标准是国家标准局发布的全国性指导技术文件,包括强制性标准(代号 GB)和推荐性标准(代号 GB/T);强制性标准是全国必须执行的技术文件,产品的技术指标不得低于标准的规定,推荐性标准执行时也可采用其他标准的规定。

行业标准是为了规范本行业产品质量而制定的技术标准,也是全国性的指导技术文件,一般由各行业主管部门发布,技术要求或指标应该高于国家标准,如建工行业标准(JG、JGJ)、建材行业标准(JC)、交通行业标准(JT、JTJ、JTG)、水利行业标准(SL)等。

地方标准 (DB) 是地方主管部门发布的地方性技术指导文件, 仅适用于本地区, 所制定的技术要求应高于国家标准。

企业标准 (QB) 是由企业制定发布的指导本企业生产的技术文件, 仅适用于本企业。企业标准的技术要求要高于地方标准。没有制定国家标准和行业标准的产品, 均应制定企业标准, 且技术要求要高于类似或相关产品的国家标准。

必须指出, 工程中使用的土木工程材料除必须满足产品标准外, 有时还必须满足有关的设计规范、施工及验收规范或规程等的规定。这些规范或规程对土木工程材料的选用、使用、质量要求及验收等还有专门的规定 (其中有些规范或规程的规定与土木工程材料产品标准的要求相同)。无论是国家标准还是部门行业标准, 都是全国通用标准, 属国家指令性技术文件, 均必须严格遵照执行, 尤其是强制性标准。在学习有关标准时应注意到黑体字标志的条文为强制性条文。

世界各国政府及非政府组织非常重视土木工程材料的标准化, 制定了各自的标准。随着涉外土建工程及国际合作项目的逐渐增多, 工程技术人员和土建类大学生也应对国内外的有关技术标准有所了解, 如国际标准化组织指定的国际通用标准 (ISO)、美国材料试验协会标准 (ASTM)、德国工业标准 (DIN)、英国标准 (BS)、日本工业标准 (JIS) 和法国标准 (NF) 等。

技术标准的表示方法由标准名称、部门代号、编号和批准年份四部分组成。例如, GB 175—2007《通用硅酸盐水泥》, 部门代号为 GB (表明是国家标准), 编号为 175, 批准年份为 2007 年, 属于强制性标准。本书内容所涉及我国常用的土木工程材料标准和检验标准见表 1-3。本书中再次提及相应标准时, 只列出标准名称。

表 1-3 常用土木工程材料标准和检验标准

| 标准名称                        | 标准号             | 标准名称                      | 标准号              |
|-----------------------------|-----------------|---------------------------|------------------|
| 《建筑生石灰》                     | JC/T 479—2013   | 《塑性体改性沥青防水卷材》             | GB 18243—2008    |
| 《建筑消石灰》                     | JC/T 481—2013   | 《铝箔面石油沥青防水卷材》             | JC/T 504—2007    |
| 《天然石膏》                      | GB/T 5483—2008  | 《弹性体改性沥青防水卷材》             | GB 18242—2008    |
| 《建筑石膏》                      | GB 9776—2008    | 《聚氯乙烯 (PVC) 防水卷材》         | GB 12952—2011    |
| 《通用硅酸盐水泥》                   | GB 175—2007     | 《石油沥青玻璃纤维胎防水卷材》           | GB/T 14686—2008  |
| 《道路硅酸盐水泥》                   | GB/T 13693—2005 | 《硅酮建筑密封胶》                 | GB/T 14683—2003  |
| 《抗硫酸盐硅酸盐水泥》                 | GB/T 748—2005   | 《建筑设计防火规范》                | GB 50016—2014    |
| 《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检测方法》    | GB/T 1346—2011  | 《建筑材料及制品燃烧性能分级》           | GB 8624—2012     |
| 《水泥压蒸安定性试验方法》               | GB/T 750—1992   | 《碳素结构钢》                   | GB/T 700—2006    |
| 《水泥胶砂强度检验方法 (ISO 法)》        | GB/T 17671—1999 | 《低合金高强度结构钢》               | GB/T 1591—2008   |
| 《水泥胶砂流动度测定方法》               | GB/T 2419—2005  | 《优质碳素结构钢》                 | GB/T 699—2016    |
| 《中热硅酸盐水泥、低热硅酸盐水泥、低热矿渣硅酸盐水泥》 | GB/T 200—2003   | 《金属洛氏硬度试验 第 1 部分: 试验方法》   | GB/T 230.1—2004  |
| 《铝酸盐水泥》                     | GB/T 201—2015   | 《钢筋混凝土用钢筋 第 1 部分: 热轧光圆钢筋》 | GB/T 1499.1—2008 |
| 《硫铝酸盐水泥》                    | GB 20472—2006   | 《钢筋混凝土用钢筋 第 2 部分: 热轧带肋钢筋》 | GB/T 1499.2—2007 |
| 《混凝土用水标准》                   | JGJ 63—2006     | 《冷轧带肋钢筋》                  | GB/T 13788—2008  |
| 《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》             | GB/T 1596—2005  | 《钢筋混凝土用余热处理钢筋》            | GB/T 13014—2013  |
| 《用于水泥和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》         | GB/T 18046—2008 | 《预应力混凝土用钢棒》               | GB/T 5223.3—2017 |
| 《普通混凝土力学性能试验方法标准》           | GB/T 50081—2002 | 《预应力混凝土用螺纹钢》              | GB/T 20065—2006  |
| 《建设用砂》                      | GB/T 14684—2011 | 《预应力混凝土用钢丝》               | GB/T 5223—2002   |

| 标准名称                   | 标准号               | 标准名称                  | 标准号               |
|------------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|
| 《海砂混凝土应用技术规范》          | JGJ 206—2010      | 《预应力混凝土用钢绞线》          | GB/T 5224—2003    |
| 《混凝土试验用搅拌机》            | JG 244—2009       | 《耐候结构钢》               | GB/T 4171—2008    |
| 《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》 | GB/T 50082—2009   | 《砌体结构设计规范》            | GB 50003—2011     |
| 《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》     | GB/T 50080—2002   | 《墙体材料术语》              | GB/T 18968—2003   |
| 《普通混凝土配合比设计规程》         | JGJ 55—2011       | 《烧结普通砖》               | GB/T 5101—2003    |
| 《混凝土外加剂》               | GB 8076—2008      | 《承重混凝土多孔砖》            | GB/T 25779—2010   |
| 《混凝土外加剂应用技术规范》         | GB 50119—2013     | 《烧结多孔砖和多孔砌块》          | GB/T 13544—2011   |
| 《建筑用卵石、碎石》             | GB/T 14685—2011   | 《蒸压灰砂砖》               | GB/T 11945—1999   |
| 《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》   | JGJ 52—2006       | 《粉煤灰砖》                | JC 239—2001       |
| 《混凝土质量控制标准》            | GB 50164—2011     | 《蒸压粉煤灰多孔砖》            | GB/T 26541—2011   |
| 《砌体结构工程施工质量验收规范》       | GB 50203—2011     | 《炉渣砖》                 | GB/T 525—2007     |
| 《混凝土结构工程施工质量验收规范》      | GB 50204—2015     | 《普通混凝土小型砌块》           | GB/T 8239—2014    |
| 《自密实混凝土应用技术规程》         | JGJ/T 283—2012    | 《轻集料混凝土小型空心砌块》        | GB/T 15229—2011   |
| 《混凝土泵送施工技术规程》          | JGJ/T 10—2011     | 《蒸压加气混凝土砌块》           | GB/T 11968—2006   |
| 《轻集料混凝土技术规程》           | JGJ 51—2002       | 《混凝土路面砖》              | GB/T 28635—2012   |
| 《砌筑砂浆配合比设计规程》          | JGJ 98—2010       | 《土工合成材料应用技术规范》        | GB/T 50290-2014   |
| 《预拌砂浆》                 | GB/T 25181—2010   | 《公路土工合成材料应用技术规范》      | JTG/T D32—2012    |
| 《建筑砂浆基本性能试验方法标准》       | JGJ/T 70—2009     | 《公路路基设计规范》            | JTG D30—2004      |
| 《防水沥青与防水卷材术语》          | GB/T 18378—2001   | 《木材物理力学试验方法总则》        | GB/T 1928—2009    |
| 《建筑石油沥青》               | GB/T 494—2010     | 《木材顺纹抗压强度试验方法》        | GB/T 1935—2009    |
| 《煤沥青》                  | GB/T 2290—2012    | 《木材抗弯强度试验方法》          | GB/T 1936. 1—2009 |
| 《公路沥青路面设计规范》           | JTG D50—2006      | 《陶瓷砖》                 | GB/T 4100—2006    |
| 《公路工程沥青与沥青混合料试验规程》     | JTG E20—2011      | 《卫生陶瓷》                | GB 6952—2005      |
| 《公路沥青路面施工技术规范》         | JTG F40—2004      | 《烧结保温砖和保温砌块》          | GB/T 26538—2011   |
| 《石油沥青纸胎油毡》             | GB 326—2007       | 《外墙外保温系统用钢丝网架模塑聚苯乙烯板》 | GB/T 26540—2011   |
| 《建筑石灰试验方法 第1部分:物理试验方法》 | JC/T 478. 1—2013  | 《用于水泥中的粒化高炉矿渣》        | GB/T 203—2008     |
| 《用于水泥中的火山灰质混合材料》       | GB/T 2847—2005    | 《用于水泥混合材的工业废渣活性试验方法》  | GB/T 12957—2005   |
| 《掺入水泥中的回转窑窑灰》          | JC/T 742—2009     | 《水泥助磨剂》               | GB/T 26748—2011   |
| 《水泥化学分析方法》             | GB/T 176—2008     | 《水泥细度检验方法 筛析法》        | GB/T 1345—2005    |
| 《水泥比表面积测定方法 勃氏法》       | GB/T 8074—2008    | 《水泥包装袋》               | GB 9774—2010      |
| 《白色硅酸盐水泥》              | GB/T 2015—2005    | 《彩色硅酸盐水泥》             | JC/T 870—2000     |
| 《干混砂浆散装移动筒仓》           | SB/T 10461—2008   | 《生活饮用水卫生标准》           | GB 5749—2006      |
| 《混凝土结构设计规范》            | GB 50010—2010     | 《民用建筑热工设计规范》          | GB 50176—2016     |
| 《水运工程混凝土试验规程》          | JTJ 270—1998      | 《水泥密度测定方法》            | GB/T 208—2014     |
| 《用于水泥和混凝土中的钢渣粉》        | GB/T 20491—2006   | 《建筑材料放射性核素限量》         | GB 6566—2010      |
| 《混凝土防冻剂》               | JC 475—2004       | 《混凝土膨胀剂》              | GB 23439—2009     |
| 《混凝土搅拌站(楼)》            | GB/T 10171—2008   | 《混凝土搅拌机》              | GB/T 9142—2000    |
| 《混凝土强度检验评定标准》          | GB/T 50107—2010   | 《混凝土耐久性检验评定标准》        | JGJ/T 193—2009    |
| 《砌筑砂浆增塑剂》              | JG/T 164—2004     | 《钢结构设计规范》             | GB 50017—2003     |
| 《焊接结构用耐候钢》             | GB/T 4172—2000    | 《烧结空心砖和空心砌块》          | GB/T 13545—2014   |
| 《木材抗弯弹性模量测定方法》         | GB/T 1936. 2—2009 | 《木材顺纹抗剪强度试验方法》        | GB/T 1937—2009    |
| 《木材顺纹抗拉强度试验方法》         | GB/T 1938—2009    | 《木材横纹抗压强度试验方法》        | GB/T 1939—2009    |
| 《沥青延度测定法》              | GB/T 4508—2010    | 《沥青软化点测定法 环球法》        | GB/T 4507—2014    |
| 《沥青针入度测定方法》            | GB/T 14686—2008   | 《纸面石膏板》               | GB/T 9775—2008    |
| 《陶瓷马赛克》                | GB/T 4509—2010    | 《建筑玻璃制品》              | JC/T 765—2006     |

## 1.5 土木工程材料课程的性质与任务

土木工程材料课程是土木工程、建筑学、道路桥梁与渡河工程和工程管理等大土建类专业的一门重要的技术基础课，其本身既是一门应用技术，又是学习建筑构造、房屋建筑学、建筑结构、土木工程施工等课程的基础。

本课程的教学任务主要是使学生获得有关土木工程材料的基本知识、基本理论和基本技能，掌握土木工程材料的技术性能、用途和选用原则，熟悉土木工程材料的生产过程、试验测试方法和质量控制方法，了解土木工程材料的发展趋势、工程材料性质与结构的关系，构建与大土建类学科专业相适应的土木工程材料知识体系，培养严谨认真的科学态度和综合分析解决问题的能力，并为学习后续课程打下坚实基础。

本课程内容涉及土木工程材料的基本性质、天然石材、无机气硬性胶凝材料、水泥、水泥混凝土、建筑砂浆、建筑金属材料、木材、沥青及沥青混合料、合成高分子材料等。土木工程材料是一门实践性很强的课程，学习时应注意理论联系实际，并应利用一切机会观察周围已经建成的或正在施工的土木工程，在实践中理解和掌握相关知识。

### 思考题与习题

- 1-1 简述土木工程材料与土木工程建设的关系。
- 1-2 土木工程材料可以分为哪些种类？
- 1-3 土木工程材料将有哪些发展趋势？
- 1-4 结合自己的专业，谈谈本课程的重点内容有哪些？

## 第 2 章

# 土木工程材料的基本性质

### 本章提要

本章主要介绍材料在土木工程及其建设过程中所表现的基本物理性质、力学性质和耐久性的概念、指标或计算等。本章教学重点是材料密度、孔隙率、材料热工性质、材料性能的影响因素等；难点在于开口孔隙在表观密度、孔隙率计算过程中的影响，与水有关的各项性能指标容易混淆，表征材料各项技术性质的技术指标、测试方法及其原理等。通过本章学习，应掌握土木工程材料的基本物理性质、力学性质和耐久性；了解土木工程材料的分类、基本组成、结构和构造及其与材料基本性质的关系。

材料作为工程性质的载体，在一定程度上决定了工程结构的可靠、耐久和使用性能。因此，在工程建设中选择、应用、分析和评价材料，通常以其性质为依据。

土木工程材料的基本性质是在实际使用过程中材料所表现出来的性质，通常也是必须考虑的最基本和共有的性质。不同性质的材料在土木工程中发挥着不同的作用，如结构材料应具有所需要的力学性能，屋面材料应具有保温隔热、防水抗渗性能，长期暴露于大气环境中的材料要能够经受风吹、日晒、雨淋、冰冻等各种不利因素的影响。通常，材料的基本性质可分为基本物理性质、基本力学性质和耐久性等。

土木工程材料的性质是科学设计和施工的基础，为在工程中科学合理地利用材料，必须掌握有关材料的基本性质，以及决定或影响这些性质的因素与规律，以便在实际使用中基于对这些性质涵义的正确理解，以及对不同性质之间的相互关联的科学推理，掌握这些性质的影响因素与改进方法，在土木工程中充分利用材料的各项潜在功能。

## 2.1 材料的基本物理性质

### 2.1.1 材料的密度、表观密度与堆积密度

#### 1. 密度

密度是绝对密实状态下单位体积材料所具有的质量，即材料质量（ $m$ ）与其绝对密实体积（ $V$ ）之比，通常以  $\rho$  表示，其计算公式为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2-1)$$

式中， $\rho$  为材料的密度（ $\text{g}/\text{cm}^3$ ）； $m$  为材料的质量（干燥至恒重）（ $\text{g}$ ）； $V$  为材料的绝对密实体积，即实体体积（ $\text{cm}^3$ ）。

质量是指材料所含物质的多少，通常以重力的大小来近似衡量材料的质量。重力的大小等于材料质量与重力加速度之积，它与质量的概念有本质的区别。绝对密实体积（ $V$ ）是指不包括材料内部孔隙的固体物质实体的体积（见图 2-1a）。在自然界和现实工程中，绝对密实状

态的材料是不存在的,除钢材、玻璃等部分材料可视为接近绝对密实,绝大多数材料内部都含有一定的孔隙。

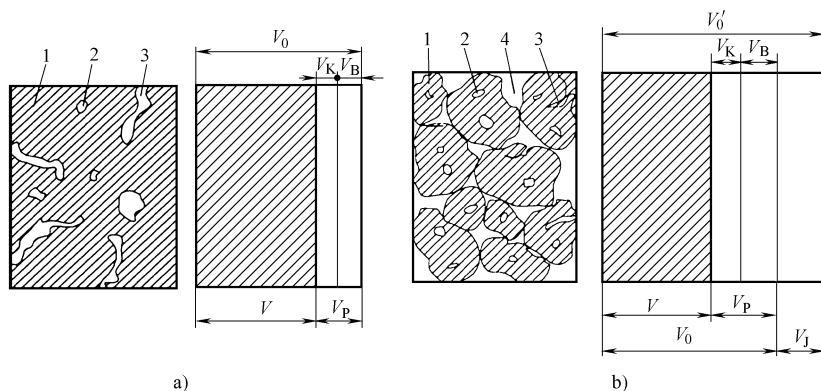


图 2-1 材料的体积组成示意图

a) 整体材料体积组成及孔隙结构示意图 b) 颗粒堆积材料体积组成及孔隙、空隙结构示意图

1—实体 ( $V$ ) 2—闭口孔 ( $V_B$ ) 3—开口孔 ( $V_K$ ) 4—颗粒间空隙 ( $V_J$ )

测定有孔隙材料的密度时,通常将材料磨成一定细度的粉末,干燥后用李氏瓶(见图 13-1)测定其体积。

### 2. 表观密度

表观密度是材料在自然状态下单位体积的质量,即材料质量( $m$ )与其表观体积( $V_0$ )之比,通常以 $\rho_0$ 表示,其计算公式为

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

式中, $\rho_0$ 为材料的表观密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ ); $m$ 为材料的质量(干燥至恒重)( $\text{kg}$ ); $V_0$ 为材料的表观体积( $\text{m}^3$ )。

表观体积是指整体材料的外观体积,由于表观体积中包含了材料内部孔隙(开口孔和闭口孔)的体积,其值通常小于密度值。显然,在用排水法或排油法测定材料表观体积用以确定表观密度时,应将材料表面封蜡后再测量。

### 3. 堆积密度

堆积密度是指粉状或散粒材料在自然堆积状态下单位堆积体积的质量,即材料质量( $m$ )与其堆积体积( $V'$ )之比,通常以 $\rho'$ 表示,其计算公式为

$$\rho' = \frac{m}{V'} \quad (2-3)$$

式中, $\rho'$ 为材料的堆积密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ ); $m$ 为材料的质量( $\text{kg}$ ); $V'$ 为材料的堆积体积( $\text{m}^3$ )。

颗粒材料的堆积体积中既包含颗粒固体实体、颗粒内部的开口孔隙、闭口孔隙,也包含颗粒间的间隙体积(见图 2-1b)。材料的堆积密度不仅与其颗粒的宏观结构、含水状态等有关,而且还与其颗粒间空隙或颗粒间被挤压实的程度等因素有关。因此,有干堆积密度及湿堆积密度之分,也有紧密堆积密度和松散堆积密度之别。堆积体积的大小可用其所占有容器中的容积大小来测量,或通过测量其规则堆积形状的几何尺寸计算求得。常用土木工程材料的密度、表观密度、堆积密度见表 2-1。

表 2-1 常用土木工程材料的密度、表观密度、堆积密度

| 材料名称    | 密度/(g/cm <sup>3</sup> ) | 表观密度/(kg/m <sup>3</sup> ) | 堆积密度/(kg/m <sup>3</sup> ) |
|---------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 钢材      | 7.85                    | 7800~7850                 | —                         |
| 石灰石(碎石) | 2.48~2.76               | 2300~2700                 | 1400~1700                 |
| 砂       | 2.50~2.60               | —                         | 1500~1700                 |
| 水泥      | 2.80~3.10               | —                         | 1600~1800                 |
| 粉煤灰(气干) | 1.95~2.40               | —                         | 550~800                   |
| 烧结普通砖   | 2.60~2.70               | 1600~1900                 | —                         |
| 普通水泥混凝土 | —                       | 2000~2800                 | —                         |
| 红松木     | 1.55~1.60               | 400~600                   | —                         |
| 普通玻璃    | 2.45~2.55               | 2450~2550                 | —                         |
| 铝合金     | 2.70~2.90               | 2700~2900                 | —                         |

## 2.1.2 材料的孔隙率与空隙率

### 1. 孔隙率与密实度

材料中所含孔隙的多少常以孔隙率表示,它是指材料所含孔隙的体积( $V_p$ )占材料自然状态下总体积即表观体积( $V_0$ )的百分率,以 $P$ 表示,其计算公式为

$$P = \frac{V_p}{V_0} = \frac{V_0 - V}{V_0} \times 100\% = \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right) \times 100\% \quad (2-4)$$

密实度是与孔隙率相对应的概念,指材料的体积内被固体物质充实的程度,用 $D$ 表示,可用式(2-5)计算,显然 $P+D=1$ 。

$$D = \frac{V}{V_0} \times 100\% = \frac{\rho_0}{\rho} \times 100\% \quad (2-5)$$

材料的许多性质都与其孔隙率有关,如强度、热工性质、声学性质、吸水性、吸湿性、抗冻性及抗渗性等。除了孔隙率以外,材料中孔隙的种类、孔径大小、孔的分布状态也是影响其性质的重要因素之一,通常称之为孔特征。

### 2. 空隙率、填充率与压实度

散粒材料在堆积状态下颗粒间空隙体积( $V_j$ )占总堆积体积( $V'$ )的百分率称为空隙率,以 $P'$ 表示,其计算公式为

$$P' = \frac{V' - V_0}{V'} \times 100\% = \left(1 - \frac{\rho'}{\rho_0}\right) \times 100\% \quad (2-6)$$

填充率是与空隙率对应的概念,指散粒材料在堆积状态下颗粒的填充程度,即颗粒体积占总堆积体积( $V'$ )的百分率,以 $D'$ 表示,可用下式计算,显然 $P' + D' = 1$ 。

$$D' = \frac{V_0}{V'} \times 100\% = \frac{\rho'}{\rho_0} \times 100\% \quad (2-7)$$

空隙率反映了堆积材料中颗粒间空隙的多少,它对于研究堆积材料的结构稳定性、填充程度及颗粒间相互接触连接的状态具有实际意义。

工程实践表明,堆积材料的空隙率较小时,说明其颗粒间相互填充的程度较高或接触连接的状态较好,其堆积体的结构稳定性也较好。通常采用压实或振实的方法促使堆积材料形成更为稳定的状态,工程实际中常以压实度作为评定堆积材料结构稳定性的指标之一。

压实度是指颗粒堆积材料被压实的程度,并以经压实后材料实际堆积干密度 $\rho'$ 与在标准条件下经充分压实所得的最大干密度 $\rho'_m$ 之比值表示。其计算公式为

$$K_y = \frac{\rho'}{\rho'_m} \times 100\% \quad (2-8)$$

式中,  $K_y$  为材料的压实度 (%);  $\rho'$  为施工现场的材料, 经压实后的实测干堆积密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $\rho'_m$  为在试验室内, 以标准方法将试样充分压实后所测得的最大干堆积密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )。

【例 2-1】 现有某干燥状态卵石 3360kg, 堆积体积为  $2\text{m}^3$ 。从中称取 10.6g 测得体积为  $4.06\text{cm}^3$ , 用李氏瓶法测得排出水的体积为 4mL, 求石子的密度、表观密度、堆积密度、孔隙率和空隙率。

解: 根据材料密度定义, 该卵石的密度为

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{10.6\text{g}}{4\text{cm}^3} = 2.65\text{g}/\text{cm}^3 = 2650\text{kg}/\text{m}^3$$

同理, 该卵石的表观密度为

$$\rho_0 = \frac{m}{V_0} = \frac{10.6\text{g}}{4.06\text{cm}^3} = 2.61\text{g}/\text{cm}^3 = 2610\text{kg}/\text{m}^3$$

堆积密度

$$\rho'_0 = \frac{m}{V'_0} = \frac{3360\text{kg}}{2\text{m}^3} = 1680\text{kg}/\text{m}^3$$

卵石的孔隙率

$$P = \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right) \times 100\% = \left(1 - \frac{2610}{2650}\right) \times 100\% = 1.5\%$$

空隙率

$$P' = \left(1 - \frac{\rho'_0}{\rho_0}\right) \times 100\% = \left(1 - \frac{1680}{2610}\right) \times 100\% = 35.6\%$$

### 2.1.3 材料与水有关的性质

#### 1. 亲水性与憎水性

与水接触时, 有些材料能被水润湿, 而有些材料则不能被水润湿, 前者表明材料具有亲水性, 而后者则为憎水性。工程实际中, 通常以润湿角的大小来划分材料的亲水性或憎水性。润湿角是水与材料接触时, 在材料、水和空气三相交点处, 沿水表面的切线与水与固体接触面所成的夹角  $\theta$ , 其值越小, 材料浸润性越好, 越易被水润湿。当材料的润湿角  $\theta \leq 90^\circ$  时, 为亲水性材料; 当材料的润湿角  $\theta > 90^\circ$  时, 为憎水性材料, 如图 2-2 所示。

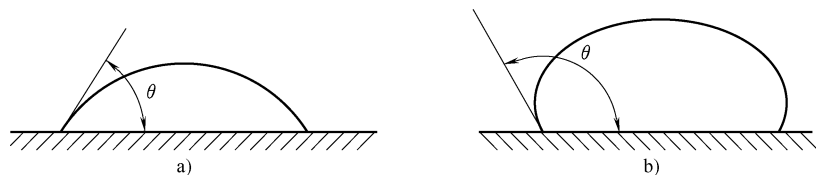


图 2-2 材料润湿示意图

a) 亲水性材料 b) 憎水性材料

材料具有亲水性或憎水性的根本原因在于材料的分子结构 (极性分子或非极性分子), 亲水性材料与水分子之间的分子亲和力大于水本身分子的内聚力; 反之, 憎水性材料与水分子之间的亲和力小于水本身分子间的内聚力。常见土木工程材料中, 水泥制品、玻璃、陶瓷、金属材料、石材等无机材料和部分木材为亲水性材料; 塑料、沥青、油漆、防水油膏、石蜡等为憎水性材料。

#### 2. 吸水性与吸湿性

(1) 吸水性 材料在水中吸收水分的性质, 称为材料的吸水性, 用吸水率表示, 可分为质量吸水率和体积吸水率。

1) 质量吸水率 ( $W_m$ ) 是指材料在吸水饱和时所吸水量占材料干燥质量的百分比, 计算