

土  
木  
工  
程  
系  
列  
从  
书

# 土木工程 材料

(第二版)

■ 吴科如 张 雄 主编



同济大学出版社  
TONGJI UNIVERSITY PRESS



土木工程系列丛书

# 土木工程材料

(第二版)

吴科如 张 雄 主编



同济大学出版社  
TONGJI UNIVERSITY PRESS

## 内 容 提 要

本书主要介绍土木工程中常用建筑材料的基本组成、材料性能、质量要求及检验方法,包括气硬性无机胶凝材料,水泥,混凝土,建筑砂浆,工程石材,墙体材料和层面材料,土木工程用钢材和铝合金,木材,高分子建筑材料,沥青与沥青混合料,建筑功能材料,土木工程材料试验等。

本书根据国家教育部有关技术基础课基本要求编写,供大专院校土建类专业作为教材使用,也可供建筑设计、施工、管理、监理技术人员参考。

为了帮助广大学生学好“土木工程材料”这门课程,作者编写了《土木工程材料重点知识与题库》与教材配套使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

土木工程材料/吴科如 张雄主编. —2版. —上海:  
同济大学出版社,2008.8  
ISBN 978-7-5608-2603-5

I. 土… II. ①吴…②张… III. 土木工程—建筑  
教材—高等学校—教材 IV. TU5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 023452 号

---

## 土木工程材料(第二版)

吴科如 张 雄 主编

责任编辑 缪临平

责任校对 徐春莲

封面设计 潘向葵

---

出版发行 同济大学出版社 [www.tongjipress.com.cn](http://www.tongjipress.com.cn)

(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 常熟市大宏印刷有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 23.75

印 数 22 401—28 500

字 数 593 000

版 次 2008 年 8 月第 2 版 2011 年 8 月第 5 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-2603-5

---

定 价 49.00 元

---

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

## 第二版前言

《土木工程材料》于2003年6月出版第一版,它是在《建筑材料》(第一版,1996年;第二版,1998年)的基础上重新编写而成的。《土木工程材料》第一版出版以来,受到广大读者的欢迎,被不少重点院校土建类专业选为教学用书;许多建筑设计、施工、管理和监理技术人员将其作为日常查阅书籍,至今已印刷了7次。然而,随着社会和科学技术的发展,在《土木工程材料》第一版出版至今的5年多时间里,土木工程材料品种不断涌现,施工技术不断创新,有关标准和规范多次更新,为了适应这些变化,我们决定重新编写该书。

与《土木工程材料》第一版相同,第二版仍以国家建设部高等土木工程专业委员会制定的土木工程专业培养目标、培养规格和土木工程专业课程设置为指导原则,以专业委员会审定的土木工程材料课程教学大纲为基本依据进行修订。编写内容力求体现土木工程材料国内外的新成果及我国有关的新标准、新规范。此外,根据课程配套的试验课程需要,按照无机类土木工程材料、金属、有机类土木工程材料、功能性土木工程材料的顺序,对原书的章节作了适当调整。

本书由同济大学吴科如、张雄主编,各章节编写人员为:绪论——吴科如,第一章——管小军,第二章——张永娟,第三章——张雄,第四章——吴科如,第五章——张雄,第六章——杜红秀,第七章——王中平,第八章——王劲,第九章——钟世云,第十章——管小军,第十一章——马一平,土木工程材料试验——王劲。本书由同济大学出版社缪临平副编审组稿、策划,在此我们表示衷心感谢。

由于编者水平的局限性,本书难免有谬误之处,恳请广大读者批评指正。

编者

2008年6月

# 第一版前言

《建筑材料》(第一版,1996;第二版,1998)出版发行后,受到广大读者的欢迎,被不少重点院校土建类专业选用为教学用书。许多建筑设计、施工、管理和监理技术人员将其置于案头作为日常查阅书籍,其第一版、第二版均多次印刷。近年来,建筑材料技术和产品不断创新,有关标准和规范已更新。根据社会和科学技术发展,我们重新编写了该书并更名为《土木工程材料》。

本书以国家建设部高等土木工程专业委员会制定的土木工程专业培养目标、培养规格及土木工程专业课程设置方案为指导原则,以专业委员会审定的土木工程材料课程教学大纲为基本依据编写。编写内容汲取了近年国内外土木工程材料新成就和我国有关新标准、新规范的内容。并根据土木工程领域技术发展需求,调查、更新和充实了传统建筑材料教科书的构架和内容,使之更适合现代社会的知识需求和教学要求。

本书由同济大学吴科如、张雄教授主编。各章编写人员为:绪论——吴科如;第一章——管小军;第二章——王中平;第三章——王劲;第四章——杜红秀;第五章——张永娟;第六章——窦丹若、张雄;第七章——鞠丽艳、张雄;第八章——吴科如;第九章——钟世云;第十章——管小军;第十一章——马一平;土木工程材料试验——王劲。该书新版本由同济大学出版社缪临平副编审组稿、策划,在此我们向他表示衷心感谢。

由于编者水平的局限性,本书难免有谬误之处,诚请广大读者指正。

编者

2003年4月

第二版前言

第一版前言

|           |   |
|-----------|---|
| 绪 论 ..... | 1 |
|-----------|---|

|                       |   |
|-----------------------|---|
| 第一章 土木工程材料的基本性质 ..... | 4 |
|-----------------------|---|

第一节 材料的物理性质 / 4

第二节 材料的基本力学性质 / 11

第三节 材料的耐久性 / 14

第四节 材料的组成与结构 / 16

第五节 材料的环境负荷性及其使用的健康安全性 / 18

复习思考题 / 20

|                     |    |
|---------------------|----|
| 第二章 气硬性无机胶凝材料 ..... | 21 |
|---------------------|----|

第一节 石膏 / 21

第二节 石灰 / 26

第三节 菱苦土 / 31

第四节 水玻璃 / 32

复习思考题 / 34

|              |    |
|--------------|----|
| 第三章 水泥 ..... | 35 |
|--------------|----|

第一节 硅酸盐水泥 / 36

第二节 掺混合材的硅酸盐水泥 / 45

第三节 其他品种水泥 / 51

复习思考题 / 58

|               |    |
|---------------|----|
| 第四章 混凝土 ..... | 60 |
|---------------|----|

第一节 概述 / 60

- 第二节 普通混凝土的组成材料 / 61
- 第三节 混凝土的性能 / 81
- 第四节 混凝土质量控制与强度评定 / 92
- 第五节 普通混凝土配合比设计 / 96
- 第六节 水泥混凝土技术进展 / 104
- 复习思考题 / 116

## 第五章 建筑砂浆 ..... 118

- 第一节 建筑砂浆基本组成与性质 / 118
- 第二节 常用建筑砂浆 / 123
- 第三节 商品砂浆 / 130
- 第四节 建筑保温节能体系用砂浆 / 136
- 复习思考题 / 140

## 第六章 工程石材、墙体材料和屋面材料 ..... 141

- 第一节 工程石材 / 141
- 第二节 墙体材料 / 151
- 第三节 屋面材料 / 177
- 复习思考题 / 179

## 第七章 土木工程用钢材和铝合金 ..... 180

- 第一节 钢的生产和分类 / 181
- 第二节 化学成分对钢材性能的影响 / 184
- 第三节 钢材的技术性质 / 185
- 第四节 钢材的冷加工和热处理 / 189
- 第五节 钢材(结构)的连接 / 190
- 第六节 土木工程用钢、钢材的标准和选用 / 193
- 第七节 钢材的腐蚀和防护 / 206
- 第八节 铝及铝合金 / 208
- 复习思考题 / 211

## 第八章 木材 ..... 213

- 第一节 概述 / 213
- 第二节 木材的分类和构造 / 214
- 第三节 木材的性质 / 217
- 第四节 木材的防护 / 223
- 第五节 木材的综合利用 / 225
- 复习思考题 / 228

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| <b>第九章 高分子建筑材料</b> .....   | 229 |
| 第一节 高分子建筑材料的基本性能 / 230     |     |
| 第二节 高分子建筑材料和制品 / 247       |     |
| 复习思考题 / 260                |     |
| <b>第十章 沥青与沥青混合料</b> .....  | 261 |
| 第一节 石油沥青 / 261             |     |
| 第二节 石油沥青的技术性质和要求 / 265     |     |
| 第三节 沥青混合料 / 269            |     |
| 第四节 热拌沥青混合料的配合比设计 / 273    |     |
| 复习思考题 / 278                |     |
| <b>第十一章 建筑功能材料</b> .....   | 279 |
| 第一节 防水材料 / 279             |     |
| 第二节 绝热材料 / 290             |     |
| 第三节 吸声隔声材料 / 301           |     |
| 第四节 装饰材料 / 305             |     |
| 第五节 防火材料 / 319             |     |
| 复习思考题 / 328                |     |
| <b>土木工程技术材料试验</b> .....    | 329 |
| 试验一 基本物理性质试验 / 329         |     |
| 试验二 钢筋拉伸、弯曲试验 / 331        |     |
| 试验三 木材强度、含水率试验 / 334       |     |
| 试验四 水泥凝结时间、安定性和强度试验 / 339  |     |
| 试验五 混凝土用砂、石试验 / 343        |     |
| 试验六 普通混凝土稠度、强度试验 / 348     |     |
| 试验七 砂浆试验 / 355             |     |
| 试验八 砌墙砖抗压强度试验 / 358        |     |
| 试验九 石油沥青针入度、延度、软化点试验 / 359 |     |
| 试验十 沥青混合料表观密度、稳定度试验 / 363  |     |
| <b>参考文献</b> .....          | 369 |

## 绪 论

土木工程材料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。在我国现代化建设中,土木工程材料占有极为重要的地位。由于组分、结构和构造不同,土木工程材料品种门类繁多、性能各不相同、价格相差悬殊,同时,其在土木工程中用量巨大,因此,正确选择和合理使用土木工程材料,对整个土木工程的安全、实用、美观、耐久及造价有着重大的意义。一般来说,优良的土木工程材料必须具备足够的强度,能够安全地承受设计荷载;自身的重量(表观密度)以轻为宜,以减少下部结构和地基的负荷;具有与使用环境相适应的耐久性,以便减少维修费用;用于装饰的材料,应能美化房屋并产生一定的艺术效果;用于特殊部位的材料,应具有相应的特殊功能,例如屋面材料要能隔热、防水,楼板和内墙材料要能隔声等。除此之外,土木工程材料在生产过程中还应尽可能保证低能耗、低物耗及环境保护。

土木工程材料可按不同原则进行分类。根据材料来源,可分为天然材料及人造材料;根据使用部位,可分为承重材料、屋面材料、墙体材料和地面材料等;根据其功能,可分为结构材料、装饰材料、防水材料、绝热材料等。目前,通常根据组成物质的种类及化学成分,将土木工程材料分为无机材料、有机材料和复合材料三大类,各大类中又可进行更细的分类,如图0-1所示。

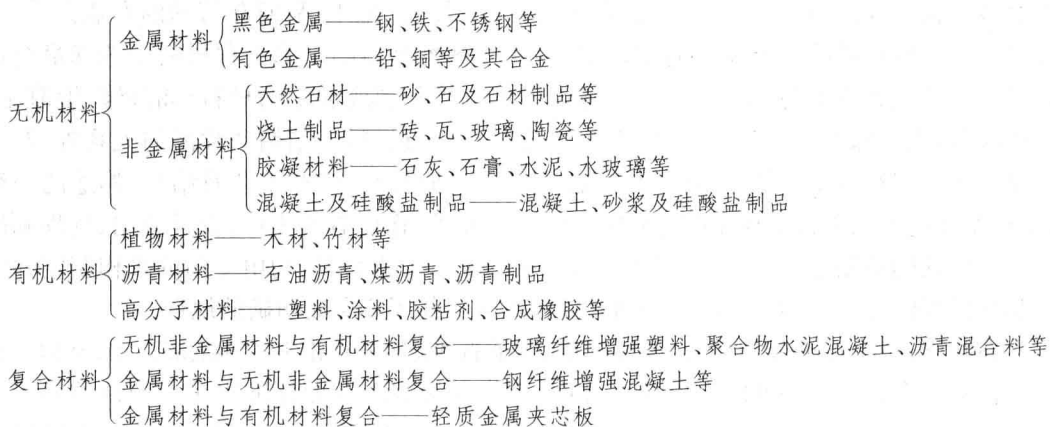


图0-1 土木工程材料的分类

土木工程材料是随着人类社会生产力和科学技术水平的提高而逐步发展起来的。人类最早穴居巢处。随着社会生产力的发展,人类进入能制造简单工具的石器、铁器时代,才开

始挖土、凿石为洞,伐木搭竹为棚,有了利用天然材料建造非常简陋的房屋等土木工程。到了人类能够用粘土烧制砖、瓦,用岩石烧制石灰、石膏之后,土木工程材料才由天然材料进入了人工生产阶段,为较大规模建造土木工程创造了基本条件。18世纪至19世纪,资本主义兴起,促进了工商业及交通运输业的蓬勃发展,原有的土木工程材料已不能与此相适应,在其他科学技术进步的推动下,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,为现代土木工程材料奠定了基础。进入20世纪后,由于社会生产力突飞猛进,以及材料科学与工程学的形成和发展,土木工程材料不仅性能和质量不断改善,而且品种不断增加,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、防水抗渗材料以及耐磨、耐腐蚀、防爆和防辐射材料等应运而生。

既然土木工程材料是土木工程的物质基础,土木工程材料的发展必然与土木工程建设技术的进步有着不可分割的联系,它们相互制约、相互依赖和相互推动。新型土木工程材料的诞生推动了土木工程设计方法和施工工艺的变化,而新的土木工程设计方法和施工工艺对土木工程材料品种和质量提出更高和多样化的要求。随着人类的进步和社会的发展,更有效地利用地球有限的资源,全面改善及迅速扩大人类工作与生存空间势在必行,未来的土木工程建筑必将需要在各种苛刻的环境条件下,实现多功能化,甚至智能化,满足愈来愈高的安全、舒适、美观、耐久的要求。土木工程材料在原材料、生产工艺、性能及产品形式诸方面均将面临可持续发展和人类文明进步的严酷挑战。今后,在原材料方面要最大限度地节约有限的资源,充分利用再生资源及工农业废料;在生产工艺方面要大力引进现代技术,改造或淘汰陈旧设备,降低原材料及能源消耗,减少环境污染;在性能方面要力求轻质、高强、耐久、多功能及结构—功能(智能)一体化;在产品形式方面要积极发展预制技术,逐步提高构件化、单元化的水平。当前具有自感知、自调节、自修复能力的土木工程材料的开发研制以及各种机敏或智能材料在土木工程中应用的研究正在蓬勃开展。

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,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,涉及众多学科。对于从事土木工程设计、施工、科研和管理的专业人员,掌握各种土木工程材料的性能及其适用范围,以便在种类繁多的土木工程材料中选择最合适的加以应用是至关重要的。除了那些在施工现场直接配制或加工的材料(如砂浆、混凝土、金属焊接等)需要深入学习其原材料、生产工艺以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,也需了解其原材料、生产工艺及结构、构造的一般知识,以明了这些因素是如何影响材料的性能的。此外,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,对于绝大多数常用的土木工程材料,均由专门的机构制定并发布了相应的“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。国家标准是由国家标准局发布的全国性的指导技术文件,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(或总局)发布,如建材行业标准代号为JC,建工行业标准的代号为JG,交通行业标准代号为JT;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;企业标准则仅适用于本企业,其代号为QB。凡没有制定国家标准、行业标准的产品,均应制定企业标准。随着我国对外开放和加入世界贸易组织(WTO),常常还涉及一些与土

本工程材料关系密切的国际或外国标准,其中主要有:国际标准,代号为 ISO;美国材料试验学会标准,代号为 ASTM;日本工业标准,代号为 JIS;德国工业标准,代号为 DIN;英国标准,代号为 BS;法国标准,代号为 NF 等。熟悉有关的技术标准并了解制定标准的科学依据,也是十分必要的。

本课程作为土木工程类各专业基础课,将通过课堂教学,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,进行系统讲述。在本课程的学习过程中,要注意了解事物的本质和内在联系。例如,学习某一种材料的性质时,不可仅满足于甲、乙、丙、丁地知道该材料具有哪些性质,有哪些表象。更重要的是应当知道形成这些性质的内在原因和这些性质之间的相互关系。对于同一类属的不同品种的材料、不但要学习它们的共性,更重要的是要了解它们各自的特性和具备这些特性的原因。又如,学习各种水泥时,不仅要知道它们都能在水中变硬等共同性质,更要注意它们的各自质的区别及因而反映在性能上的差异。一切材料的性质都不是固定不变的,在使用过程中,甚至在运输和储存过程中,它们的性质都在或多或少、或快或慢、或显或隐地不断起着变化,因而影响它的耐久性。为了控制材料在使用前和使用中的变质问题,我们还必须了解引起变化的外界条件和材料本身的内在原因,从而了解变化的规律,以保证工程的耐久性。

在教学中,除了课堂教学,还应安排必要的实验课。实验课是本课程必不可少的重要教学环节,其任务是验证基本理论、学习试验方法和技术、培养严谨缜密的科学态度和科学研究能力。进行实验时,要严肃认真,一丝不苟,即使对操作简单的一些实验,也不应例外。特别应注意了解实验条件对实验结果的影响,并对实验结果作出正确的分析和判断。

## 第一章

# 土木工程材料的基本性质

材料是构成土木工程的物质基础。所有的建筑物、桥梁、道路等都是由各种不同的材料经设计、施工建造而成。这些材料所处的环境和部位不同,所起的作用也各不相同,为此要求材料必须具备相应的基本性质。

例如,用作受力构件的结构材料,要承受各种力的作用,因此必须具有良好的力学性质。根据土木工程功能的需要,还要求材料具有相应的防水、绝热、隔声、防火、装饰等性质,如墙体材料应具有绝热、隔声性质;屋面材料应具有防水性质;路面材料应具有防滑、耐磨损性质等。由于土木工程在长期的使用过程中,经常要受到风吹、雨淋、日晒、冰冻和周围各种有害介质的侵蚀,故还要求材料具有良好的耐久性质。另外,为了把工程建设对自然环境的负面影响控制在最小的范围内,实现建筑与环境的和谐共存,创造健康、舒适的生活环境,要求生产和选用的土木工程材料是绿色和生态的。

可见,材料的应用与其所具有的性质是密切相关的。根据材料科学的基本理论,材料的性质又是由材料的组成、结构(或构造)等因素所决定的。所以,为了确保工程项目能安全、经济、美观、经久耐用,并有利于节约资源和生态环境保护,就需要我们掌握材料的性质,并了解它们与材料的组成、结构的关系,从而合理的选用材料。

## 第一节 材料的物理性质

### 一、与质量状态有关的物理性质

#### 1. 密度( $\rho$ )

密度(又称真密度)是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  $\rho$ ——密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )或( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$m$ ——材料在干燥状态下的质量( $\text{g}$ )或( $\text{kg}$ );

$V$ ——材料在绝对密实状态下的体积( $\text{cm}^3$ )或( $\text{m}^3$ )。

所谓绝对密实状态下的体积,是指不含有任何孔隙的体积。土木工程材料中除了钢材、玻璃等少数材料外,绝大多数材料都含有一定的孔隙,如砖、石材等常见的块状材料。对于

这些有孔隙的材料,测定其密度时,须先把材料磨成细粉,经干燥至恒重后,用李氏瓶测定其体积,然后按上式计算得到密度值。材料磨得越细,测得的数值就越准确。

材料的密度( $\rho$ )大小取决于组成物质的原子量和分子结构。重金属材料的密度为7.50~9.00 g/cm<sup>3</sup>;硅酸盐的密度多在1.80~3.30 g/cm<sup>3</sup>之间;有机高分子材料的密度小于2.50 g/cm<sup>3</sup>;同为碳原子组成,石墨的分子结构较松散,密度为2.20 g/cm<sup>3</sup>,而金刚石则极为坚实,密度高达3.50 g/cm<sup>3</sup>。

## 2. 表观密度( $\rho'$ )

表观密度(又称视密度、近似密度)是指材料在自然状态下,不含开口孔时单位体积的质量。按下式计算:

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

式中  $\rho'$ ——表观密度(g/cm<sup>3</sup>)或(kg/m<sup>3</sup>);

$V'$ ——材料在自然状态下不含开口孔隙时的体积(cm<sup>3</sup>)或(m<sup>3</sup>);

$V_b$ ——材料内部闭口孔隙的体积(cm<sup>3</sup>)或(m<sup>3</sup>)。

材料在自然状态下由于内部孔隙的存在,当材料含有水分时,它的质量和体积都会发生变化,因而表观密度亦不相同,故测定材料表观密度时,材料必须绝对干燥。

## 3. 容积密度( $\rho_0$ )

容积密度(又称体积密度,俗称容重)是指材料在自然状态下,单位宏观外形体积的质量。按下式计算:

$$\rho_0 = \frac{m}{V_0} = \frac{m}{V + V_b + V_k} \quad (1-3)$$

式中  $\rho_0$ ——容积密度(g/cm<sup>3</sup>)或(kg/m<sup>3</sup>);

$V_0$ ——材料在自然状态下的宏观外形体积(cm<sup>3</sup>)或(m<sup>3</sup>);

$V_k$ ——材料内部开口孔隙的体积(cm<sup>3</sup>)或(m<sup>3</sup>)。

材料在自然状态下的宏观外形体积指包含材料内部所有孔隙(含开口和闭口孔隙)的体积。对材料进行容积密度试验时,其质量可以是在任意含水状态下,但应注明其含水情况,未特别标明时,常指气干状态下的容积密度。在材料对比试验时,则在绝干状态下进行。

粉状材料如水泥、消石灰粉等,其平均颗粒粒径甚小,与一般块体材料测定密度时所研碎制作的试样粒径相近,因而它们在绝干状态下的容积密度,与密度值很接近,可视为相等。对于形状不规则的材料,可涂蜡后采用排水法测定其体积。

## 4. 堆积密度( $\rho'_0$ )

堆积密度是指散粒材料或粉状材料,在自然堆积状态下单位体积的质量。按下式计算:

$$\rho'_0 = \frac{m}{V'_0} = \frac{m}{V_0 + V_v} \quad (1-4)$$

式中  $\rho'_0$ ——堆积密度(g/cm<sup>3</sup>)或(kg/m<sup>3</sup>);

$V'_0$ ——材料的堆积体积(cm<sup>3</sup>)或(m<sup>3</sup>);

$V_v$ ——散粒材料或粉状材料间空隙的体积(cm<sup>3</sup>)或(m<sup>3</sup>)。

这里,材料的堆积体积指在自然、松散状态下,按一定方法装入一定容器的容积,包括颗

粒体积和颗粒之间空隙的体积。若以捣实体积计算时,则称紧密堆积密度。

常用的散粒材料或粉状材料,如砂、石子、水泥等,它们都直接以颗粒状态使用,不再加工成块状材料,这些材料也可按上述方法求出它们的密度,但工程意义不一样。如在土木工程中,当需计算散粒材料的堆放空间时,不需考虑每个颗粒内部的孔隙,而是要知道其堆积密度。

## 二、与构造状态有关的物理性质

### 1. 孔隙率与密实度

孔隙率是指材料内部孔隙体积占其总体积的百分率。按下式计算:

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

式中  $P$ ——材料的孔隙率(%)。

与孔隙率相对应的密实度,即材料体积内被固体物质充实的程度。用下式表示:

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

式中  $D$ ——材料的密实度(%)。

材料孔隙率或密实度大小直接反映材料的密实程度。材料的孔隙率高,则表示密实程度小。

必须指出,材料内部的孔隙是各式各样的,十分复杂,如大小、形状、分布、连通与否等,以上均属孔隙构造上的特征,统称为孔隙特征。孔隙特征对材料的物理、力学性质均有显著影响。在一般工程应用上,材料的孔隙特征通常主要是指孔隙的连通性,按此可将孔隙分为开口孔隙和闭口孔隙。

开口孔隙(简称开孔)是指材料内部孔隙不仅彼此互相贯通,并且与外界相通,如常见的毛细孔。在一般浸水条件下,开孔能吸水饱和。开口孔隙能提高材料的吸水性、透水性、吸声性,并降低材料的抗冻性。

闭口孔隙(简称闭孔)是指材料内部孔隙彼此不连通,而且与外界隔绝。闭口孔隙能提高材料的保温隔热性能和材料的耐久性。

由此可见,材料的孔隙率  $P$  也可分为开口孔隙率( $P_k$ )和闭口孔隙率( $P_b$ ),即:

$$P = P_k + P_b \quad (1-7)$$

### 2. 空隙率和填充率

空隙率是指散粒或粉状材料颗粒之间的空隙体积占其自然堆积体积的百分率。用下式表示:

$$P' = \frac{V'_0 - V_0}{V'_0} \times 100\% = \left(1 - \frac{\rho'_0}{\rho_0}\right) \times 100\% \quad (1-8)$$

式中  $P'$ ——材料的空隙率(%)。

与空隙率相对应的填充率,即散粒材料堆积体积中,颗粒填充的程度。按下式计算:

$$D' = \frac{V_0}{V_0'} \times 100\% = \frac{\rho_0'}{\rho_0} \times 100\% = 1 - P' \tag{1-9}$$

式中  $D'$ ——材料的填充率(%)。

在上述各参数中,密度并不能反映材料的性质,但可以大致了解材料的品质,并可用它计算材料的孔隙率,以及进行混凝土配合比的计算。

表观密度建立了材料自然体积与质量之间的关系,在土木工程中可用来计算材料用量、构件自重、确定材料堆放空间等。

孔隙率和孔隙特征反映材料的密实程度,并和材料的许多性质都有密切关系,如强度、吸水性、保温性、耐久性等。

空隙率在配制混凝土时可作为控制砂、石级配与计算配合比时的重要依据。

常用土木工程材料的密度、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 <sup>3</sup> ) | 表观密度(kg/m <sup>3</sup> ) | 堆积密度(kg/m <sup>3</sup> ) |
|-------|------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 钢     | 7.85                   | —                        | —                        |
| 花岗岩   | 2.60~3.00              | 2 500~2 900              | —                        |
| 石灰石   | 2.60~2.80              | 1 600~2 400              | 1 400~1 500(碎石)          |
| 砂     | 2.40~2.70              | —                        | 1 400~1 700              |
| 粘土    | 1.80~2.00              | —                        | 1 350~1 600              |
| 水泥    | 2.80~3.10              | —                        | 1 250~1 600              |
| 烧结普通砖 | 2.00~2.70              | 1 600~1 900              | —                        |
| 烧结多孔砖 | 2.00~2.70              | 900~1 450                | —                        |
| 普通混凝土 | —                      | 1 950~2 500              | —                        |
| 红松木   | —                      | 400~500                  | —                        |
| 泡沫塑料  | —                      | 20~50                    | —                        |

三、材料与水有关的性质

1. 亲水性与憎水性

材料在使用过程中,经常会与水分接触。然而水分与材料表面的亲和情况是不同的。

材料与水接触时能被水润湿的性质称为亲水性。具备这种性质的材料称为亲水性材料。大多数的土木工程材料,如钢材、混凝土、木材等都属于亲水性材料。

材料与水接触时不能被水润湿的性质称为憎水性。具备这种性质的材料称为憎水性材料,如石蜡、聚氯乙烯管材、沥青基防水材料等。

材料的亲水性与憎水性可用润湿角  $\theta$  来表示,如图 1-1 所示。 $\theta$  愈小,表明材料愈易被水润湿。一般认为,当润湿角  $\theta \leq 90^\circ$  时,这种材料称为亲水性材料,表明水分子之间的内聚力小于水分子与材料分子间的吸引力;当润湿角  $\theta > 90^\circ$  时,这种材料称为憎水性材料,表明水分子之间的内聚力大于水分子与材料分子间的吸引力。



图 1-1 材料润湿角

亲水性材料可以被水润湿,即水可以在材料表面铺展开,而且当材料存在孔隙时,水分能通过孔隙的毛细作用自动渗入材料内部;而憎水性材料则不能被水润湿,水分不易渗入材料毛细管中。憎水性材料常用作防水材料。而对亲水性材料表面进行憎水处理,可改善其耐水性能。

## 2. 吸水性与吸湿性

材料在水中吸收水分的能力称为吸水性。吸水性的常以吸水率表示。有以下两种表示方法:

### (1) 质量吸水率

指材料吸水饱和时,所吸水量占材料绝干质量的百分率。用公式表示如下:

$$W_m = \frac{m_{\text{饱}} - m}{m} \times 100\% \quad (1-10)$$

式中  $W_m$ ——材料的质量吸水率(%);

$m_{\text{饱}}$ ——材料吸饱水时的质量(g)或(kg)。

### (2) 体积吸水率

指材料吸水饱和时,所吸水分的体积占绝干材料自然体积的百分率。用公式表示为:

$$W_v = \frac{m_{\text{饱}} - m}{V_0} \cdot \frac{1}{\rho_w} \times 100\% \quad (1-11)$$

式中  $W_v$ ——材料的体积吸水率(%);

$\rho_w$ ——水的密度。常温下取  $\rho_w = 1(\text{g}/\text{cm}^3)$ 。

质量吸水率与体积吸水率的关系为:

$$W_v = W_m \cdot \rho_0 \quad (1-12)$$

$W_v$  可用来说明材料内部孔隙被水充满的程度。实际上,材料的吸水率与孔隙构造有很大关系。若材料具有微细而连通的孔隙,则吸水率就较大;若是具有封闭孔隙,则水分就难以渗入,吸水率就较小;若是较粗大开口的孔隙,水分虽容易进入,但不易在孔内保留,仅起到润湿孔壁的作用,吸水率也较小。所以,不同的材料或同种材料不同的内部构造,其吸水率会有很大的差别。

材料在潮湿空气中吸收水分的性质称为吸湿性。材料的吸湿性常以含水率表示。可用以下公式表示:

$$W_{\text{含}} = \frac{m_{\text{含}} - m}{m} \times 100\% \quad (1-13)$$

式中  $W_{\text{含}}$ ——材料的含水率(%);

$m_{\text{含}}$ ——材料含水时的质量, g 或 kg。

含水率表示材料在某一状态的含水能力, 它随环境温度和空气湿度的变化而改变, 当环境温度较低且空气湿度较大时, 材料的含水率就大。与空气温湿度相平衡时的含水率称为平衡含水率(或称气干含水率)。

材料吸水或吸湿后, 对材料性质将产生一系列不良影响, 它会使材料的表观密度增大、体积膨胀、强度下降、保温性能降低、抗冻性变差等, 所以材料的含水状态对材料性质有很大的影响。

## 四、材料与热有关的性质

### 1. 导热性

材料传导热量的性质称为导热性。即当材料两侧存在温度差时, 热量从温度高的一侧向温度低的一侧传导。常用导热系数表示材料的导热性。匀质材料的导热系数计算公式为:

$$\lambda = \frac{Q\delta}{(T_1 - T_2)At} \quad (1-14)$$

式中  $\lambda$ ——材料的导热系数( $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ );

$Q$ ——传热量(J);

$\delta$ ——材料厚度(m);

$T_1 - T_2$ ——材料两侧的温差( $T_1 > T_2$ ) (K);

$A$ ——传热面积( $\text{m}^2$ );

$t$ ——传热时间(s)。

导热系数越小, 表示材料越不容易导热。通常将  $\lambda \leq 0.23 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  的材料称为绝热材料。常用绝热材料有: 矿棉、膨胀珍珠岩、泡沫塑料等。

### 2. 热阻

材料层厚度  $\delta$  与导热系数  $\lambda$  的比值, 称为热阻  $R = \delta/\lambda (\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W})$ , 它表明热量通过材料层时所受到的阻力。

在同样的温差条件下, 热阻越大, 通过材料层的热量越少, 应用热阻的概念计算起来十分方便。在多层平壁导热条件下, 平壁的总热阻等于各单层材料的热阻之和。

导热系数或热阻是评定材料绝热性能的主要指标。其大小受材料的孔隙结构、含水状况影响很大。通常材料的孔隙率越大、表观密度越小, 导热系数就越小, 因为空气的导热系数只有  $0.025 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ; 具有细微而封闭孔结构的材料, 其导热系数比具有较粗大或连通孔结构的材料小; 由于水的导热系数较大  $0.58 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , 冰的导热系数更大  $2.33 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , 所以材料受潮或冰冻后, 导热性能会受到严重影响, 所以保温材料在存放、施工和使用过程中, 要采取措施保持干燥状态。导热系数和热阻还与材料的组成、温度等因素有关。例如: 金属材料、无机材料、晶体材料的导热系数一般分别大于非金属材料、有机材料和非晶体材料; 温度越高, 材料的导热系数越大(金属材料除外)。

### 3. 热容量

材料受热时吸收热量, 冷却时放出热量的性质, 称为热容量, 用比热表示:

$$c = \frac{Q}{m \cdot (T_1 - T_2)} \quad (1-15)$$