

土木工程材料

性能、应用与生态环境

施惠生 主编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

土木工程材料

性能、应用与生态环境

施惠生 主编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

本书介绍的土木工程材料包括气硬性胶凝材料、水泥、混凝土、建筑砂浆、无机非金属材料、土木工程用钢材、建筑塑料、沥青材料、木材及其他工程材料等。主要论述了这些材料的基本组成、品质特性、质量要求、检测方法、选用原则，重点介绍了土木工程材料与生态环境的关系。书中还介绍了常见的土木工程材料试验。

本书适用于高等工科院校的土木工程专业和其他相关专业作为教学用书，也可作为土木工程类、材料科学与工程类和环境科学与工程类科研、设计、管理和施工人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

土木工程材料：性能、应用与生态环境/施惠生主编. —北京：中国电力出版社，2008
ISBN 978 - 7 - 5083 - 6631 - 9

I. 土… II. 施… III. 土木工程 - 建筑材料 IV. TU5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 013720 号

中国电力出版社出版发行

北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>

责任编辑：张鹤凌 责任印制：陈焊彬 责任校对：郝军燕

北京丰源印刷厂印刷·各地新华书店经售

2008 年 6 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16 · 24 印张 · 596 千字

定价：48.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失

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

本社购书热线电话 (010 - 88386685)

前 言

随着我国国民经济的高速发展,房地产业迅速崛起,市政基础设施和房屋建筑工程规模也越来越大,从而使得土木工程材料的需求量急剧攀升。同时,土木工程材料工业的迅猛发展带来了一系列的环境问题。然而,21世纪是绿色的世纪,保护环境、节约资源已经成为全球的共识,可持续发展已成为人类的共同话题,世界各国都在为这一目标而努力。中国作为发展中的大国,在发展经济的同时已逐步意识到了环境保护的重要性。近几年,我国一再强调,要大力发展循环经济和清洁生产,实现自然生态系统和社会经济系统的良性循环,为子孙后代留下充足的发展条件和发展空间。

因此,节省能源、资源,达到与环境共生的目的,是21世纪土木工程材料发展的方向。作为新时代的教材,本书在吸取、发扬传统土木工程材料教材优势和特长的原则指导下,适当增加了发展循环经济和保护生态环境的内容。作者在编写本书时注意采用现行的最新标准和规范,书中各章分别介绍了常用土木工程材料的基本性能及应用,并增添了近年来正在发展的部分新型土木工程材料。本书主要内容包括气硬性胶凝材料、水泥、混凝土、砂浆、无机非金属烧结材料、钢材、塑料、沥青材料、木材及其他工程材料等。并在此基础上,进一步介绍了各种土木工程材料与生态环境的关系,旨在使读者了解和认识到在生产和使用土木工程材料时如何将其对生态环境的破坏性降至最低,以及如何为土木工程材料绿色化做一点贡献。作者通过对本书的编写,期望有利于开阔读者思路,使读者能够在土木工程材料的使用中合理地选用材料,不仅要考虑到材料的性能是否满足工程需要,更需要考虑是否会对生态环境带来不利影响。

在以土木工程见长并闻名于世的同济大学迎来建校百年之际,我们编写了这本书,期望为土木工程材料的生态化及绿色化尽绵薄之力。本书由同济大学环境材料研究所所长、博士生导师施惠生教授主编;王中平副教授及阚黎黎博士和郭晓璐博士为副主编。各章的主要编写人员分别为:第1、6章阚黎黎;第2、10章许碧莞;第3章刘红岩;第4章郭灿贤;第5章邓恺;第7章张思宇;第8章王中平;第9章郭晓璐;第11章张新辉;第12章原峰、刘金为;第13章吴敏、王中平。在本书的编写过程中,李启令副教授为本书提出了宝贵的建议并审阅了大纲,同时,本书还得到了姚玉梅、施京华、沙丹丹、郭飞、李纹纹、袁懿玲、吴凯、张贺、方泽峰、王红芳、茅正云、范敬友、章萍等的帮助,在此一并表示感谢!

由于编者水平及时间有限,书中如有不当及错漏之处,敬请广大读者批评指正。

编者

目 录

前言

第1章 绪言	(1)
1.1 概述	(1)
1.1.1 土木工程材料的分类	(1)
1.1.2 土木工程材料的标准化	(2)
1.2 材料的基本状态参数	(3)
1.2.1 材料的密度、表观密度和堆积密度	(3)
1.2.2 材料的孔隙率与密实度	(5)
1.2.3 材料的空隙率与填充率	(6)
1.3 材料的力学性质	(6)
1.3.1 理论强度	(6)
1.3.2 强度和比强度	(7)
1.3.3 弹性与塑性	(8)
1.3.4 脆性与韧性	(9)
1.3.5 硬度和耐磨性	(10)
1.4 材料与水有关的性质	(10)
1.4.1 材料的亲水性与憎水性	(10)
1.4.2 材料的含水状态	(11)
1.4.3 材料的吸水性与吸湿性	(11)
1.4.4 材料的耐水性	(12)
1.4.5 材料的抗渗性	(13)
1.4.6 材料的抗冻性	(13)
1.5 材料的热性质	(14)
1.5.1 导热性	(14)
1.5.2 热阻	(14)
1.5.3 热容量和比热容	(14)
1.5.4 热变形性	(15)
1.5.5 耐燃性	(15)
1.6 材料的耐久性	(16)
复习思考题	(16)
第2章 土木工程材料与生态环境	(18)
2.1 生态环境学基础	(18)
2.1.1 生态系统与生态平衡	(18)
2.1.2 环境学的基本知识	(21)
2.1.3 环境科学	(23)
2.2 材料与环境	(23)

2.2.1 全球环境状况	(23)
2.2.2 土木工程材料与环境	(24)
2.3 生态土木工程材料	(25)
2.3.1 生态土木工程材料基本概念	(25)
(1) 2.3.2 生态土木工程材料评价指标体系	(26)
(1) 2.3.3 生态土木工程材料研究开发现状	(27)
(2) 2.4 土木工程材料与循环经济	(29)
(2) 2.4.1 循环经济	(29)
(2) 2.4.2 土木工程材料与发展循环经济	(31)
(2) 复习思考题	(33)
第3章 气硬性胶凝材料	(34)
(3) 3.1 石灰	(34)
(3) 3.1.1 石灰的原材料及生产	(34)
(3) 3.1.2 石灰的熟化与硬化	(35)
(3) 3.1.3 石灰的质量标准与应用	(36)
(3) 3.2 石膏	(38)
(3) 3.2.1 石膏的原料及生产	(38)
(3) 3.2.2 建筑石膏	(39)
(3) 3.2.3 其他品种石膏胶凝材料	(41)
(3) 3.3 水玻璃	(42)
(3) 3.3.1 水玻璃的原料及生产	(42)
(3) 3.3.2 水玻璃的硬化	(42)
(3) 3.3.3 水玻璃的技术性能	(42)
(3) 3.3.4 水玻璃的应用	(43)
(3) 3.4 气硬性胶凝材料与生态环境	(44)
(3) 复习思考题	(45)
第4章 水泥	(46)
(4) 4.1 硅酸盐类水泥	(46)
(4) 4.1.1 硅酸盐水泥	(46)
(4) 4.1.2 通用水泥	(57)
(4) 4.1.3 专用水泥	(61)
(4) 4.1.4 特性水泥	(62)
(4) 4.2 其他品种水泥	(64)
(4) 4.2.1 铝酸盐水泥	(64)
(4) 4.2.2 硫铝酸盐水泥	(66)
(4) 4.2.3 膨胀水泥、自应力水泥	(67)
(4) 4.3 水泥与生态环境	(68)
(4) 复习思考题	(69)

第5章 混凝土	(70)
5.1 混凝土概述	(70)
5.1.1 混凝土的定义	(70)
5.1.2 混凝土的分类	(70)
5.1.3 混凝土的特点	(71)
5.2 普通混凝土的组成材料	(71)
5.2.1 水泥	(72)
5.2.2 矿物掺合料	(72)
5.2.3 细骨料	(76)
5.2.4 粗骨料	(80)
5.2.5 水	(83)
5.3 混凝土外加剂	(83)
5.3.1 减水剂	(84)
5.3.2 早强剂	(87)
5.3.3 引气剂	(89)
5.3.4 防冻剂	(90)
5.3.5 膨胀剂	(91)
5.3.6 调凝剂	(92)
5.3.7 防水剂	(92)
5.3.8 泵送剂	(93)
5.4 新拌混凝土的和易性	(93)
5.4.1 和易性的概念	(93)
5.4.2 和易性的测定及评价指标	(93)
5.4.3 影响和易性的主要因素	(95)
5.4.4 调整和易性的措施	(98)
5.5 硬化混凝土的强度	(98)
5.5.1 混凝土的抗压强度	(98)
5.5.2 混凝土的强度等级	(99)
5.5.3 影响混凝土强度的因素	(100)
5.5.4 提高混凝土强度的措施	(103)
5.5.5 混凝土其他强度指标	(103)
5.6 硬化混凝土的耐久性	(104)
5.6.1 混凝土的耐久性概念	(104)
5.6.2 提高混凝土耐久性的方法	(108)
5.7 硬化混凝土的变形性	(109)
5.7.1 混凝土在非荷载作用下的变形	(109)
5.7.2 混凝土在荷载作用下的变形	(110)
5.8 混凝土质量控制与强度评定	(112)
5.8.1 混凝土的质量控制	(113)

5.8.2	混凝土强度的波动规律——正态分布	(113)
5.8.3	混凝土质量评定的数理统计方法	(114)
5.8.4	混凝土配制强度	(115)
5.8.5	混凝土强度检验评定标准	(116)
5.9	普通混凝土的配合比设计	(117)
5.9.1	混凝土配合比设计的要求、依据与方法	(117)
5.9.2	混凝土配合比设计的步骤	(118)
5.9.3	普通配合比设计实例	(122)
5.10	其他种类混凝土	(123)
5.10.1	高强混凝土	(123)
5.10.2	纤维混凝土	(129)
5.10.3	轻骨料混凝土	(131)
5.10.4	自密实混凝土	(135)
5.10.5	大体积混凝土	(138)
5.10.6	装饰混凝土	(142)
5.10.7	含聚合物混凝土	(144)
5.11	混凝土与生态环境	(145)
5.11.1	混凝土与生态环境的相互影响	(145)
5.11.2	混凝土绿色化的必然性	(146)
5.11.3	混凝土绿色化的途径	(146)
	复习思考题	(148)
第6章	建筑砂浆	(150)
6.1	砂浆的技术要求	(150)
6.1.1	砂浆拌合物的密度	(150)
6.1.2	新拌砂浆的和易性	(150)
6.1.3	硬化砂浆的性能	(151)
6.2	砌筑砂浆	(153)
6.2.1	砌筑砂浆的组成材料	(153)
6.2.2	砌筑砂浆的配合比设计	(155)
6.3	其他建筑砂浆	(165)
6.3.1	抹面砂浆	(165)
6.3.2	特种砂浆	(167)
6.4	商品砂浆	(168)
6.4.1	商品砂浆的定义及其分类	(168)
6.4.2	商品砂浆的原材料	(168)
6.4.3	商品砂浆在建筑外墙外保温中的应用	(171)
6.5	砂浆与生态环境	(172)
6.5.1	商品砂浆对生态环境的保护	(172)
6.5.2	应用商品砂浆的外墙外保温系统的节能优势	(173)

复习思考题	(175)
第7章 无机非金属烧结材料	(176)
7.1 烧结普通砖	(176)
7.1.1 烧结普通砖的生产	(176)
7.1.2 烧结普通砖的技术要求	(177)
7.1.3 放射性物质	(179)
7.1.4 烧结普通砖的产品标记	(180)
7.1.5 烧结普通砖的应用	(180)
7.2 烧结多孔砖和烧结空心砖	(180)
7.2.1 烧结多孔砖	(180)
7.2.2 烧结空心砖	(182)
7.3 其他烧结材料	(184)
7.3.1 建筑陶瓷	(184)
7.3.2 建筑玻璃	(187)
7.3.3 瓦	(191)
7.4 烧结材料与生态环境	(192)
7.4.1 烧结材料对生态环境的影响	(192)
7.4.2 烧结砖瓦制品与生态环境及砖瓦的绿色化	(193)
7.4.3 建筑陶瓷制品与生态环境及其绿色化	(194)
7.4.4 建筑玻璃制品与生态环境及其绿色化	(195)
复习思考题	(196)
第8章 土木工程用钢材	(198)
8.1 钢的生产和分类	(198)
8.1.1 钢的冶炼	(198)
8.1.2 钢材的加工方法	(199)
8.1.3 钢的分类	(199)
8.1.4 钢材的分类	(200)
8.2 化学成分对钢材性能的影响	(201)
8.3 钢材的技术性质	(202)
8.3.1 力学性能	(202)
8.3.2 工艺性能	(205)
8.4 钢材的冷加工和热处理	(206)
8.4.1 冷加工强化	(206)
8.4.2 时效处理	(207)
8.4.3 钢材的热处理	(207)
8.5 钢材(结构)的连接	(207)
8.5.1 焊接连接	(207)
8.5.2 螺栓连接	(208)
8.5.3 铆钉连接	(209)

8.5.4 钢筋的绑扎搭接和机械连接	(209)
8.6 土木工程用钢、钢材的标准和选用	(210)
8.6.1 土木工程用钢的主要类别	(210)
8.6.2 钢结构用钢材	(213)
8.6.3 钢筋混凝土用钢材	(216)
8.6.4 专门结构用钢材	(221)
8.7 钢材的腐蚀与防护	(222)
8.7.1 化学腐蚀	(222)
8.7.2 电化学腐蚀	(222)
8.7.3 防腐	(223)
8.7.4 混凝土用钢筋的防锈	(223)
8.7.5 防火	(223)
8.8 钢材与生态环境	(224)
8.8.1 钢材的生态设计	(224)
8.8.2 钢铁的清洁生产	(226)
8.8.3 钢铁的再生资源利用	(227)
8.8.4 未来社会中钢铁企业的角色	(227)
复习思考题	(228)
第9章 建筑塑料	(229)
9.1 塑料的组成	(230)
9.1.1 聚合物	(230)
9.1.2 添加剂	(232)
9.2 常用的建筑塑料	(232)
9.2.1 热塑性塑料	(232)
9.2.2 热固性塑料	(234)
9.3 塑料与生态环境	(235)
9.3.1 建筑塑料的使用	(235)
9.3.2 塑料废弃物的污染	(236)
9.3.3 可降解塑料	(237)
复习思考题	(239)
第10章 沥青材料	(240)
10.1 石油沥青及煤沥青	(240)
10.1.1 石油沥青	(240)
10.1.2 煤沥青	(246)
10.2 沥青基防水材料	(247)
10.2.1 沥青基防水卷材	(247)
10.2.2 改性沥青防水卷材	(249)
10.2.3 沥青防水涂料	(250)
10.3 沥青混合料	(252)

10.3.1	概述	(252)
10.3.2	沥青混合料的组成材料	(252)
10.3.3	沥青混合料的组成结构	(254)
10.3.4	沥青混合料的技术性质	(254)
10.3.5	沥青混合料的技术指标	(255)
10.3.6	热拌沥青混合料的配合比设计	(256)
10.4	沥青材料与生态环境	(260)
10.4.1	沥青混合料对环境的影响	(260)
10.4.2	路面废旧沥青的再生利用	(261)
	复习思考题	(262)
第11章	木材	(263)
11.1	木材的分类和构造	(263)
11.1.1	分类	(263)
11.1.2	构造	(264)
11.2	木材的物理和力学性质	(265)
11.2.1	含水量	(265)
11.2.2	湿胀与干缩	(266)
11.2.3	木材的强度	(267)
11.3	木材的防护	(270)
11.3.1	干燥	(270)
11.3.2	防腐防虫	(270)
11.3.3	防火	(271)
11.4	木材的应用	(271)
11.4.1	木材初级产品	(272)
11.4.2	人造板材	(272)
11.5	木材与生态环境	(273)
11.5.1	木材的环境特性	(273)
11.5.2	木材及其制品的环境污染	(275)
11.5.3	木材及其制品生态化	(276)
11.5.4	木材及其制品循环再生	(277)
	复习思考题	(277)
第12章	其他工程材料	(278)
12.1	绝热材料	(278)
12.1.1	基本概念	(278)
12.1.2	常见绝热材料	(280)
12.2	吸声材料、隔声材料	(283)
12.2.1	吸声材料	(283)
12.2.2	隔声材料	(284)
12.3	装饰材料	(286)

12.3.1	装饰材料的分类	(286)
12.3.2	主要装饰材料	(287)
12.3.3	涂抹类装饰材料	(287)
12.3.4	涂刷类装饰材料	(289)
12.3.5	烧结类装饰材料	(290)
12.4	新型防水材料	(291)
12.4.1	防水卷材	(292)
12.4.2	防水涂料	(296)
12.4.3	防水密封材料	(301)
12.4.4	刚性防水材料	(304)
12.4.5	堵漏止水材料	(306)
12.5	其他工程材料与生态环境	(307)
12.5.1	绝热材料与生态环境	(307)
12.5.2	吸声、隔声材料与生态环境	(309)
12.5.3	装饰材料与生态环境	(309)
12.5.4	防水材料与生态环境	(310)
	复习思考题	(311)
第13章	土木工程材料试验	(313)
试验一	材料基本物理性质试验	(313)
试验二	水泥试验	(315)
试验三	混凝土用骨料试验	(323)
试验四	普通混凝土试验	(334)
试验五	砂浆试验	(342)
试验六	烧结普通砖抗压强度试验	(346)
试验七	钢筋试验	(348)
试验八	木材含水率和顺纹强度试验	(351)
试验九	石油沥青试验	(356)
试验十	绝热材料稳态热性能试验	(360)
试验十一	建筑吸声产品吸声系数测量试验	(363)
试验十二	建筑防水涂料试验	(366)

第1章 绪 言

1.1 概述

土木工程材料是指用于建筑物各个部位的各种构件和结构体所使用的材料及制品总称,是构成建筑结构物的最基本元素,因而它是一切土木建筑工程的物质基础。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,利用天然材料建造非常简陋的房屋等土木建筑工程。到了人类能够用黏土烧制砖、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到人工生产阶段,为较大规模建造土木建筑工程创造了基本条件。18~19世纪,资本主义的兴起,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,土木工程材料进入到一个新的发展阶段,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,土木工程材料不仅在性能和质量上不断得到改善,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应运而生。

1.1.1 土木工程材料的分类

在我国现代化建设中,土木工程材料占有及其重要的地位。能用于土木建筑工程的材料品种门类繁多、性能各异、用途不同、价格相差较大,同时,土木工程材料用量巨大;因而,正确选择及合理使用土木工程材料,在很大程度上决定着建筑物的安全、适用和美观,又在很大程度上影响着结构形式和施工速度。为了便于选择,首先应对其进行合理分类。

土木工程材料可从不同角度进行分类,工程中常做如下分类。

1. 按组成物质的种类及化学成分划分

根据材料组成物质的种类及化学成分,可分为无机材料、有机材料及有机-无机复合材料三大类,具体细分如图1-1所示。

2. 按材料来源划分

根据材料的来源,可分为天然材料及人造材料。

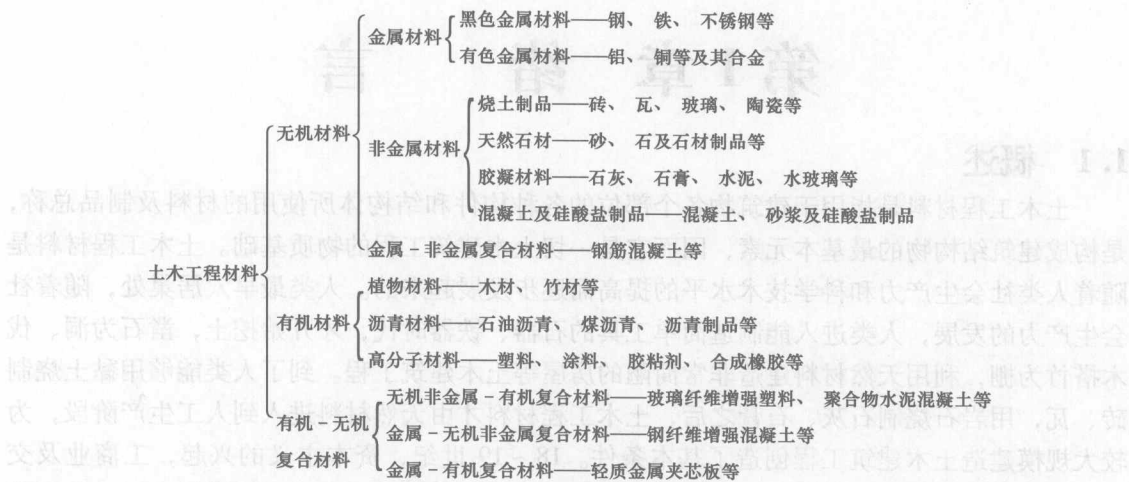
3. 按材料功能划分

根据材料的功能,可分为两大类。

结构材料——主要用作承重的材料,如梁、板、柱所用材料。

功能材料——主要是利用材料的某些特殊功能,如用于装饰、防水抗渗、绝热、保温、吸声、耐热防火、耐磨、耐腐蚀、防爆、防腐蚀等的材料。

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;自身的质量(表观密度)以轻为宜,可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,应能美化房屋并能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,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、低物耗及环境友好。

1.1.2 土木工程材料的标准化

为了适应现代化生产科学管理的需要，有关机构必须对土木工程材料产品的各项技术制订统一的执行标准，作为有关生产、设计应用、管理和研究等部门共同遵循的依据。这些标准通常对其产品规格、分类、技术要求、检验方法、验收方法、验收规则、标志、运输和储存等方面作了详尽而明确的规定。

世界各国对土木工程材料的标准化都非常重视，均有自己的国家标准，随着我国对外开放和加入世界贸易组织（WTO），常常会涉及这些标准，其中主要有：世界范围统一使用的国际标准，代号为 ISO；美国材料试验学会标准，代号为 ASTM；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；日本工业标准，代号为 JIS 等。熟悉相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。

目前，我国常用的技术标准分为如下四大类。

1. 国家标准

国家标准是由国家标准局发布的全国性的指导技术文件。国家标准有强制性标准（代号为 GB）、推荐性标准（代号为 GB/T）。

2. 行业标准

行业标准也是全国性的指导技术文件，但是它由主管生产部（或总局）发布，如建材行业标准（代号为 JC）、建工行业标准（代号为 JG）、冶金行业标准（代号为 YB）、交通行业标准（代号为 JT）。

3. 地方标准

地方标准是地方主管部门发布的地方性指导技术文件（代号为 DB）。

4. 企业标准

企业标准则仅适用于本企业（代号为 QB）。凡没有制订国家标准、行业标准的产品，均应制订企业标准。

5. 标准的表示方法

标准的一般表示方法,是由标准名称、部门代号、编号和批准年份等组成。

(1) 国家标准(强制性)。《钢筋混凝土用热轧带肋钢筋》(GB 1499—1998)。

(2) 国家标准(推荐性)。《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》(GB/T 1346—2001)。

(3) 建工行业标准(推荐性)。《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2000)。

(4) 建材行业标准(推荐性)。《喷涂聚氨酯硬泡体保温材料》(JC/T 998—2006)。

(5) 地方性标准(推荐性)。《建筑外墙弹性涂料应用技术规程》(DBJ/T 01—57—2001)。

(6) 企业标准(推荐性)。《装饰灯泡》(QB/T 2055—2005)。

对于强制性国家标准,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,表示也可以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。

1.2 材料的基本状态参数

在建筑物或构筑物中,土木工程材料要承受各种不同的作用,要求土木工程材料具备相应不同的性质。如建筑物的梁、板、柱以及承重墙体主要承受荷载的作用;屋面要承受风霜雨雪的侵蚀且能绝热、防水等;墙体要起到抗冻、绝热、隔声等作用;基础除承受建筑物全部荷载外,还要承受冰冻及地下水的侵蚀。此外,长期暴露在大气环境中或与侵蚀性介质相接触的各种建筑物或构筑物,还会受到冲刷、磨损、化学侵蚀、生物作用、干湿循环、冻融循环等破坏作用。为了保证建筑物或构筑物的耐久性,要求在工程设计与施工中正确选择和合理使用材料,因此,必须熟悉和掌握各种土木工程材料的基本状态参数。

1.2.1 材料的密度、表观密度和堆积密度

1. 材料的密度(ρ)

密度是指材料在绝对密实状态下单位体积的质量。按式(1-1)计算:

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

式中 ρ ——材料的密度, g/cm^3 ;

m ——材料在干燥状态下的质量, g ;

v ——材料在绝对密实状态下的体积, cm^3 。

所谓绝对密实状态下的体积,是指不含有任何空隙的体积。常用土木工程材料中,除了钢材、玻璃等少数材料外,绝大多数材料内部都有一些孔隙,如砖、石材等块状材料。在测定这些有孔隙材料的密度时,应把材料磨成细粉,经干燥至恒重后,用李氏瓶测定其绝对密实体积,然后按式(1-1)计算得到密度值。材料磨得越细,内部孔隙消除得越完全,测得的密实体积数值也就越精确;因此,一般要求细粉的粒径至少小于0.20mm。

材料的密度 ρ 值的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 $7.50 \sim 9.00 \text{g}/\text{cm}^3$;硅铝酸盐的密度多在 $1.80 \sim 3.30 \text{g}/\text{cm}^3$ 之间;有机高分子材料的密度小于 $2.50 \text{g}/\text{cm}^3$ 。同为碳原子组成,石墨的分子结构较松散,密度为 $2.20 \text{g}/\text{cm}^3$,而金刚石极为坚实,密度高达 $3.50 \text{g}/\text{cm}^3$ 。

2. 材料的表观密度 (ρ_0)

表观密度 (俗称容重) 是指材料在自然状态下单位体积的质量。按式 (1-2) 计算:

$$\rho_0 = \frac{m}{v_0} \quad (1-2)$$

式中 ρ_0 ——材料的表观密度, kg/m^3 或 g/cm^3 ;

m ——材料的质量, kg 或 g ;

v_0 ——材料在自然状态下的体积 (包括材料实体及其内部孔隙的体积), m^3 或 cm^3 。

表观密度亦称颗粒表观密度, 是指在自然状态下颗粒单位体积 (包括内部孔隙体积) 的质量, 而不包括颗粒间的空隙体积。

测定材料自然状态体积的方法较简单, 对于规则形状材料的体积, 可直接度量外形尺寸, 按几何公式计算, 如加气混凝土砌块的自然状态下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, 可用排液法求得, 为了防止液体由孔隙渗入材料内部而影响测量值, 应在材料表面封蜡后用排液法测得。

此外, 材料的表观密度与含水状况有关。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, 以干燥状态为准, 而对含水状态下测定的表观密度, 应注明含水情况, 未特别标明者, 常指气干状态下的表观密度。在材料对比试验时, 则在绝对干燥状态下进行。

质地坚硬的散粒材料如砂、石子等, 粉状材料如水泥、消石灰粉等, 其平均颗粒粒径甚小, 与一般块状材料测定密度时所研碎制作的试样粒径相近, 因而它们的表观密度 (特别是干表观密度值) 与密度值很接近, 可视为相等。

3. 材料的堆积密度 (ρ_0')

堆积密度是指散粒状材料或粉状材料在自然堆积状态下单位体积的质量。按式 (1-3) 计算:

$$\rho_0' = \frac{m}{v_0'} \quad (1-3)$$

式中 ρ_0' ——堆积密度, kg/m^3 ;

m ——材料的质量, kg ;

v_0' ——材料的自然堆积体积, m^3 。

材料的自然堆积体积包括材料绝对体积、内部所有孔隙体积及颗粒间的空隙体积。材料的堆积密度反映散粒状材料堆积的紧密程度及材料可能的堆放空间, 常用其所填满的容器的标定容积来表示。若散粒状材料的堆积方式是松散的, 即为自然堆积, 由自然堆积测试得到的是自然堆积密度; 若是捣实的, 即为紧密堆积, 由紧密堆积测试得到的是紧密堆积密度。

经常使用大量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。工程使用中, 一般不需要考虑每个颗粒内部的孔隙, 而是要知道其堆积密度。

在土木建筑工程中, 计算材料用量、构件自重、配料计算、确定堆放空间以及运输量时, 经常要用到材料的密度、表观密度和堆积密度等数据。土木工程常用材料的密度、表观密度及堆积密度见表 1-1。

表 1-1

土木工程常用材料的密度、表观密度及堆积密度

材料名称	密度/(g/cm ³)	表观密度/(kg/m ³)	堆积密度/(kg/m ³)
钢	7.85	—	—
花岗岩	2.70~3.00	2500~2900	—
石灰石	2.40~2.60	1600~2400	1400~1700 (碎石)
砂	2.50~2.60	—	1450~1650
黏土	2.50~2.70	—	1600~1800
水泥	2.80~3.10	—	1250~1600
烧结普通砖	2.60~2.70	1600~1900	—
烧结多孔砖	2.60~2.70	900~1450	—
普通混凝土	—	1950~2500	—
红松木	—	400~500	—
泡沫塑料	—	20~50	—

1.2.2 材料的孔隙率与密实度

1. 材料的孔隙率 (P)

大多数土木工程材料的内部都含有孔隙,这些孔隙会对材料的性能产生不同程度的影响。通常认为,孔隙可从两个方面对材料产生影响:一是孔隙的多少;二是孔隙的特征。材料中含有孔隙的多少常用孔隙率来表征。孔隙率是指材料内部孔隙的体积(V_p)占材料总体积(V_0)的百分率。因为 $V_p = V_0 - V$ (三者单位相同; V 为材料在绝对密实状态下的体积),所以孔隙率 P 的计算公式为

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

式中 P ——材料孔隙率,%;

V_0 ——材料总体积(在自然状态下的体积,包括材料实体及其内部所含孔隙体积),
cm³ 或 m³;

V ——材料在绝对密实状态下的体积, cm³ 或 m³。

2. 材料的密实度 (D)

与材料孔隙率相对应的另一个概念,是材料的密实度。密实度表示材料体积内被固体物质充实的程度。它在量上反映了材料内部固体物质的实体积占材料总体积的百分率,可用式(1-5)表示:

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

式中 D ——材料的密实度,%。

从式(1-5)可看出,密实度对于材料性质的影响正好与孔隙率的影响相反。材料的孔隙率高,则密实度小。

此外,材料的孔隙特征(指材料孔隙的大小、形状、分布、连通与否等孔隙构造方面的特征)对材料的物理、力学性质均有显著影响。以下为经常涉及的特征。

(1) 按孔隙尺寸大小,可把孔隙分为微孔、细孔和大孔三种。

(2) 按孔隙之间是否相互贯通,把孔隙分为互相隔开的孤立孔,或互相贯通的连通孔。

(3) 按孔隙与外界之间是否连通,把孔隙分为与外界相连通的开口孔隙(简称开孔),或不相连通的封闭孔隙(简称闭孔)(图1-2)。若把开孔的孔体积记为 V_K ,闭孔的孔体积