

TUMU GONGCHENG



应用型本科院校
土木工程专业系列教材

YINGYONGXING BENKE YUANXIAO
TUMU GONGCHENG ZHUANYE XILIE JIAOCAI



土木工程材料课程 学习指导及难点解析

TUMU GONGCHENG CAILIAO KECHENG
XUEXI ZHIDAO JI NANDIAN JIEXI

主 编 ■ 贾兴文

主 审 ■ 钱觉时 王 冲



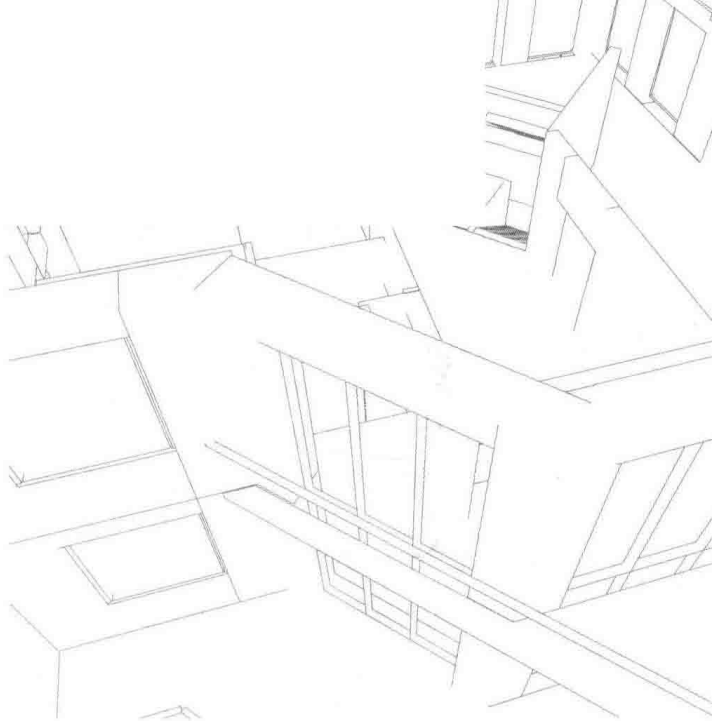
重庆大学 出版社

TUMU
GONGCHENG



应用型本科院校
土木工程专业系列教材

YINGYONGXING BENKE YUANXIAO
TUMU GONGCHENG ZHUANYE XILIE JIAOCAI



土木工程材料课程 学习指导及难点解析

TUMU GONGCHENG CAILIAO KECHENG
XUEXI ZHIDAO JI NANDIAN JIEXI

主 编 ■ 贾兴文

主 审 ■ 钱觉时 王 冲

清华大学出版社

内容提要

本书根据土木工程材料课程的教学要求和学习要求,并参考相关教材、专著和现行的国家标准、行业标准以及建设工程领域的相关团体标准编写而成。本书依据高等学校土木工程本科指导性专业规范,标注了土木工程材料课程主要知识点的学习要求,便于学生更快地把握课程学习重点。为了提高学习效果,本书较为深入地阐释和解释了土木工程材料课程的学习重点和难点,对主要知识点进行了更为深入的解释和讨论,使初学者更容易理解和掌握主要知识点的概念和原理。

本书可以作为土木工程、建筑管理、交通工程等相关专业本科土木工程材料课程的课后辅导教材,也可以作为全国硕士研究生统一招生考试中考试科目名称为土木工程材料或建筑材料的专业课考研辅导书。

图书在版编目(CIP)数据

土木工程材料课程学习指导及难点解析 / 贾兴文主

编. -- 重庆:重庆大学出版社,2022.7

应用型本科院校土木工程专业系列教材

ISBN 978-7-5689-3323-0

I. ①土… II. ①贾… III. ①土木工程—建筑材料—
高等学校—教学参考资料 IV. ①TU5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2022)第 088078 号

土木工程材料课程学习指导及难点解析

主 编 贾兴文

策划编辑:王 婷

责任编辑:张红梅 版式设计:王 婷

责任校对:关德强 责任印制:赵 晟

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:饶帮华

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路 21 号

邮编:401331

电话:(023) 88617190 88617185(中小学)

传真:(023) 88617186 88617166

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn(营销中心)

全国新华书店经销

重庆俊蒲印务有限公司印刷

*

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:9.75 字数:251千

2022年7月第1版 2022年7月第1次印刷

印数:1—2 000

ISBN 978-7-5689-3323-0 定价:35.00元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书,违者必究

前 言

土木工程材料课程涉及的材料类型众多,如气硬性胶凝材料(例如石膏、石灰)、通用硅酸盐水泥、普通混凝土、建筑砂浆、建筑钢材、墙体材料、屋面材料、石材、木材、有机高分子材料、防水材料、防火材料、绝热材料、吸声和隔声材料以及建筑装饰材料等。可以说每一类材料都是一门课程,甚至是一个广阔的研究领域,学习者要在短时间内理解和掌握土木工程材料课程繁多的知识点必然非常困难,导致该课程的学习效果难以达到预期。

提高土木工程材料课程学习效果并牢固掌握诸多知识点,需要进行对比和理解性学习,注意知识点之间的联系,理解材料的基本原理并掌握其共性特点,而不是机械性地记忆知识点。土木工程材料教材涉及的领域较为宽泛,使得初学者难以把握学习重点和相关知识点之间的联系。此外,初学者在课程学习过程中习惯上采用背诵记忆的学习模式,但是土木工程材料的知识点繁多,课程学时较少,通过背诵很难真正掌握。为此,我们编写了本书,旨在更为深入地阐释课程学习的重点和难点,更为深入地解释和讨论部分知识点,使相关知识点的内容更加完善,帮助初学者更为准确地理解和掌握土木工程材料课程的知识点。

本书与重庆大学出版社出版、贾兴文主编的《土木工程材料》配套,对土木工程材料课程的主要知识点进行了梳理,并用不同符号对相关知识点进行了分类:■——需要理解和掌握的知识点,●——需要熟悉的知识点,◇——需要了解的知识,☆——扩展知识点。为了提高学习效果,全书各章后均附有练习题,以便巩固和加深。

本书由贾兴文任主编,在编写过程中,参考了相关教材、专著和现行国家标准、行业标准以及建设工程领域的相关团体标准。

重庆大学钱觉时教授、王冲教授任本书主审,在审阅本书的过程中,他们对全书内容和知

识体系存在的不足提出了很好的修改建议;研究生余金城、秦继辉、代小兵、唐浩、骆佳银、连磊、卢瑞雪、张文馨、田昊、黄宇航、张新、李俊萌和王平参与了本书的编写和文字、图表处理工作。在此,对以上人员表示由衷的感谢。

土木工程材料的生产和应用技术发展迅速,加之编者水平有限,书中难免存在不足和疏漏,欢迎广大读者批评指正。编者电子邮箱 jiaxw@cqu.edu.cn。

编 者
2021 年 12 月

目 录

1	土木工程材料的基本性质	1
1.1	材料的基本物理性质	2
1.2	材料与水有关的性质	3
1.3	材料的力学性质	5
1.4	土木工程材料的耐久性	6
2	气硬性胶凝材料	11
2.1	石膏	12
2.2	石灰	14
3	水泥	18
3.1	硅酸盐水泥	19
3.2	通用硅酸盐水泥	23
4	混凝土	27
4.1	混凝土概述	28
4.2	混凝土的组成材料	29
4.3	混凝土拌合物的和易性	36
4.4	混凝土的力学性能	39
4.5	混凝土强度的影响因素	40
4.6	混凝土变形	43

4.7	混凝土耐久性	46
4.8	混凝土配合比设计	49
4.9	混凝土的生产、运输、浇筑及养护	49
4.10	混凝土的强度评定	50
4.11	其他品种混凝土	51
5	建筑砂浆	59
5.1	建筑砂浆概述	60
5.2	砌筑砂浆和抹面砂浆	62
5.3	预拌砂浆	62
6	墙体与屋面材料	65
6.1	烧结砖	66
6.2	建筑砌块	67
6.3	建筑墙板	69
6.4	屋面材料	70
7	建筑钢材	72
7.1	建筑钢材的基本知识	73
7.2	建筑钢材的技术性质	74
7.3	建筑钢材的冷加工和热处理	77
7.4	建筑钢材的技术标准和选用	77
7.5	建筑钢材的腐蚀与防护	79
7.6	建筑钢材的防火	81
8	石材	84
9	木材	87
9.1	木材的分类	88
9.2	木材的物理力学性质	88
9.3	木材的防腐与防火	89
10	有机高分子材料	91
11	沥青及沥青混合料	94
11.1	沥青	94
11.2	改性石油沥青	96
11.3	沥青混合料	97

12 防水材料	100
13 绝热材料	103
13.1 材料的热工性质	104
13.2 绝热材料的分类和性能	105
13.3 绝热材料的工程应用	106
14 吸声和隔声材料	109
15 建筑装饰材料	112
模拟试题(一)	115
模拟试题(二)	118
模拟试题(三)	121
课后习题和模拟试题答案	124
附录 土木工程材料核心知识单元	145
参考文献	147

1

土木工程材料的基本性质

❖ 本章导读

土木工程材料的基本性质是土木工程材料课程的基础和重点。材料的基本物理力学性质在其他课程中也有涉及,有些概念甚至在高中阶段就已涉及,但本课程希望学生能通过不同视角审视和深入理解土木工程材料的共性特征。本章学习的重点是理解材料的组成(化学组成、矿物组成)、材料的结构(宏观、亚微观和微观结构)与材料物理力学性能的关系,例如矿物组成和孔隙结构对材料物理力学性能的影响,从而更好地理解 and 掌握常用土木工程材料的物理力学性能。

➤ 知识目标

(1)掌握材料的密度、表观密度、体积密度、堆积密度、密实度、孔隙率、填充率及空隙率的概念和计算方法。

(2)掌握材料的亲水性、憎水性、吸水性、吸湿性、耐水性的概念和计算方法,熟悉材料抗冻性和抗渗性的概念。

(3)掌握材料强度的基本概念和计算方法,理解材料的弹性和塑性、脆性和韧性的概念。

(4)掌握材料耐久性的概念,了解影响材料耐久性的主要因素。

➤ 技能目标

(1)能够熟练掌握密度、表观密度、体积密度、堆积密度、孔隙率、空隙率等与质量和密实度有关的物理参数的计算方法。

(2)能够熟练掌握吸水率、含水率和软化系数等指标的计算方法。

(3)能够熟练掌握材料的抗压强度、抗拉强度、抗剪强度和抗弯强度等力学性能指标的计算方法。

➤ 重点难点释疑

1.1 材料的基本物理性质

■1) 密度、表观密度、体积密度、堆积密度

密度、表观密度、体积密度和堆积密度是描述材料基本物理性质的重要物理量,是本章的重点,不仅要理解其相关概念,还要掌握其计算方法和测试方法。

表述密度概念提到的绝对密实状态是一种理论状态,毕竟常见的材料都含有孔隙,即使是钢材也含有极其微小的孔隙,只是孔隙率极低,通常认为高纯度的金属材料可以接近绝对密实状态。然而,对于常见的非金属材料,例如混凝土和烧结黏土砖,并不存在绝对密实状态,而只能磨成细粉后测试其密度。采用排水法(阿基米德法)测试材料的密度时,如测试砖粉的密度,砖粉磨得越细,密度测试值越趋近于其密度理论值(极限值)。

表观密度和体积密度的主要差异在于开口孔隙,表观密度更适合用于描述孔隙率或开口孔隙率较小且形状不规则材料的单位体积的质量,可以采用排水法或水中称重法测出材料不含开口孔隙的体积,再计算表观密度。对于形状规则(形状不规则时可以加工成规则形状),或者孔隙率较高(开口孔隙率较高)的材料,采用体积密度描述材料单位体积的质量更合适。需要注意的是,现行的部分规范并未区分表观密度和体积密度,都用表观密度表述多孔材料单位体积的质量(如混凝土的表观密度),而这里的表观密度通常包含开口孔隙,实际上是体积密度,这主要是因为材料的基本物理性质的概念和规范中相关概念的更新不协调,但这并不影响规范的使用和对规范条文的理解。

对于粉状材料的堆积密度,材料粉磨得越细,其自然堆积状态下的堆积密度就会随着粉磨时间延长而逐渐降低,即粉状材料的比表面积越大(越来越细),其堆积密度越小。

■2) 孔隙对材料性能的影响

按照普遍的规律和理解,材料孔隙率增大,材料的强度、抗渗性、耐久性和表观密度或体积密度就会随之降低,但这只是整体趋势,并不能准确描述材料的孔隙率对其物理力学性能的影响。孔是材料的构成部分,不含孔隙的绝对密实的材料只是理论上存在,常见的混凝土、墙体材料通常含有较多孔隙,属于多孔材料。对于多孔材料,孔隙特征对材料的诸多性能具有显著影响。表述孔隙特征不能仅用孔隙率,还需要考虑孔径大小、孔隙分布、孔隙开口状态(开口孔和闭口孔)等,这样才能更为准确地描述孔隙特征对材料物理力学性能的影响。

因此,在描述和分析材料的孔隙特征对其耐久性(抗渗性、抗冻性等指标)、强度、导热系数等的影响时,不能仅仅考虑孔隙率,还需要考虑孔径大小、孔隙分布、孔隙开口状态等。例如,为了提高混凝土抗冻性,可以采用掺加引气剂的方法,在混凝土中引入适量空气并形成均匀分布的闭口孔隙,从而在不显著降低混凝土抗压强度的前提下提高混凝土抗冻性。此外,对于泡沫混凝土等轻质多孔材料,在孔隙率相近的情况下,当材料中含有大量均匀分布的闭口微孔时,其热工性能和力学性能会优于含有大量分布不均匀的开口孔的材料。对于轻质多

孔材料,例如常见的建筑保温材料,当同类材料试样的表观密度相同时,材料的孔结构不同,其力学性能、吸水率和导热系数可能会存在显著差异,因此,不能简单地通过表观密度来判断轻质多孔材料的物理力学性能优劣。

对于强度,分析孔隙率对强度的影响时,不能简单地认为孔隙率增大强度必然降低。例如两组材质相同、外观尺寸相同的试件 A 和 B,由于成型质量差异,A 组试件的孔隙率较低但其含有分布不均且不规则的大尺寸孔洞,B 组试件的孔隙率较大但其包含分布均匀且近似圆形的微细孔隙。由于 A 组试件在受力时内部更容易在不规则孔隙处产生应力集中现象,因此会出现 A 组试件孔隙率小但强度测试值低的情况。

1.2 材料与水有关的性质

建筑材料,尤其是无机材料,其性能的劣化与水密切相关。建筑材料使用过程中接触到的水包括雨水、地下水、江河湖海水、生活用水以及大气中的水汽等。水不仅会影响材料的物理力学性质,同时水与侵蚀性介质的共同作用对材料的耐久性也会产生重要影响。相较于处于常温干燥环境下的建筑材料,长期处于潮湿环境或长期浸泡在水中的建筑材料,其物理力学性能更容易劣化。例如,混凝土在流动水中可能会出现溶蚀,保温材料吸水后热工性能下降,石膏板在潮湿环境中变形翘曲,建筑钢材在潮湿环境中锈蚀。因此,掌握材料与水有关的性质,是掌握建筑材料长期性能的基础。

■1) 亲水性与憎水性

材料与水接触时能被水润湿的性质称为亲水性,反之,与水接触时不能被水润湿的性质称为憎水性(也称为疏水性)。接触角 θ 是液体在三相(液体、固体、气体)交界处的夹角,也称为润湿角。1805 年,托马斯·杨通过分析作用在气体环绕的固体表面的液滴的力确定了接触角 θ 。

材料表面与水接触时, $\theta \leq 90^\circ$ 为亲水性, $\theta < 5^\circ$ 为超亲水性, $\theta = 0^\circ$ 则表示液体能完全湿润固体表面;而 $\theta > 90^\circ$ 为憎水性, $\theta > 150^\circ$ 为超疏水性, $\theta = 180^\circ$ 则液体完全不能湿润固体表面。超疏水材料的研究受到了“荷叶效应”的启发,荷叶与水的接触角大于 140° ,所以水珠在荷叶上滚动。研究荷叶表面的微纳米结构对超疏水材料的研究具有重要的启发作用。

改变接触角可以改变材料的表面性质和耐水性能,例如外墙涂料和玻璃,如果具有超疏水性,则可以实现自清洁。除了超疏水材料,超亲水材料也用途广泛,完全不沾油但完全亲水(超疏油/超亲水)的材料在油水分离等许多领域有重要的应用前景。

■2) 吸水性与吸湿性

吸水性通常用质量吸水率或体积吸水率表示。材料吸水率与其孔隙特征密切相关,如果材料内部含有大量封闭孔隙,则水分难以渗入材料内部,吸水率较小。如果材料内部含有大量粗大的开口孔隙,水分虽容易进入,但不易在孔中保留,吸水率也较小,如大孔混凝土。如果材料具有微细而连通的孔隙,则材料的吸水率高,如泡沫混凝土和蒸压加气混凝土。

材料的吸湿性与材料的孔隙特征和环境相对湿度密切相关。干燥材料在潮湿环境下能吸收空气中的水分,而潮湿材料能在干燥环境中释放水分,而且其过程是可逆的。在一定温

度和相对湿度条件下,材料含水率会逐渐达到平衡状态称为平衡含水率(或称气干含水率)。同一种材料的平衡含水率随着使用环境温度和湿度的变化而变化,例如木材,当木材含水率高于该环境下的平衡含水率时,会产生干燥收缩;当木材含水率低于该环境下的平衡含水率时,会产生吸湿膨胀。因此,木材宜干燥至达到使用环境的平衡含水率,以避免木材变形。

■3)耐水性

材料抵抗水破坏作用的性质称为耐水性,用软化系数表示,按照《土木工程材料》教材中软化系数的定义,材料的软化系数在 0 和 1 之间,也就是说材料吸水饱和状态下的抗压强度小于其干燥状态下的抗压强度。荷载作用在内部孔隙含有水分的材料上时,孔隙水在应力状态下会产生渗流现象(水或其他流体通过多孔介质缓慢流动),随着孔隙尺度的减小,应力状态下水在孔隙中流动产生的孔隙压力(应力腐蚀)会导致材料内部孔隙破坏或促进微裂缝扩展,从而加速材料破坏,因此,材料在潮湿状态下的抗压强度会低于其在干燥状态时的抗压强度。

常见的混凝土、砖、石材、建筑砂浆等多孔无机非金属材料的软化系数都不会大于 1,但是在个别论文中也存在软化系数大于 1 的现象,对学生理解软化系数的概念产生了误导。这实际上是水硬性胶凝材料在水中持续水化强度继续增长导致的错误判断,也是错误使用软化系数测试方法导致的。测试软化系数的试验过程中,水硬性胶凝材料试件,如普通硅酸盐水泥混凝土在水中长期浸泡时,其强度会持续增长。如果以水中长时间浸泡试件的抗压强度与龄期相同但一直放置于常温室内的试件的抗压强度相比,水中养护的试件的抗压强度会大于常温室养护的试件,于是出现了软化系数大于 1 的错误判断。

■4)抗渗性

抗渗性主要是指材料抵抗压力水渗透的性质,渗透系数越小,材料的抗渗性越好。但是,采用压力水渗透方法难以准确表征渗透性很低的材料(如高性能混凝土和超高性能混凝土)的抗渗性能。表征高性能混凝土或超高性能混凝土渗透性可以采用氯离子渗透性试验、气体渗透性试验等方法。渗透系数与材料的耐久性或服务寿命密切相关,对于水泥混凝土,通常认为渗透系数越小,其耐久性越好,《超高性能混凝土基本性能与试验方法》(T/CBMF 37—2018)规定:用于承重、结构的超高性能混凝土,其抗渗等级以氯离子扩散系数表示时需满足 UD05 级要求,即超高性能混凝土基体中的氯离子扩散系数 $D_{Cl} \leq 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

但是对于透水路面砖、排水沥青路面砖等材料,则要求有较高的透水系数(透水路面砖的透水系数测试方法与混凝土抗渗性测试方法不同),以满足使用功能要求。例如对于采用沥青混合料的排水沥青路面,《排水沥青路面设计与施工技术规范》(JTG/T 3350-03—2020)要求排水沥青面层渗水系数 $\geq 4\ 500 \text{ mL}/\text{min}$ 。沥青路面表层能很快透水,而又不致形成水膜,对抗滑性能有很大好处。因此,路面渗水系数已成为评价路面使用性能的重要指标,并被列入沥青路面设计规范。

■5)抗冻性

严寒环境对于很多工程材料而言都是严峻的考验,例如建筑钢材在严寒环境下其力学性能会急剧降低,甚至表现出明显的脆性。有机材料在严寒环境下也可能表现出明显的脆性。然而混凝土不害怕低温,混凝土由室内常温状态转入严寒环境时,其抗压强度并不会降低。按照《低温环境混凝土应用技术规范》(GB 51081—2015)“附录 A 低温环境混凝土检验方

法”A.2.4条规定,标准养护至设计龄期的混凝土试件,取出后用湿布擦去表面水分后静置于室内自然环境下14d,这里的室内自然环境是指温度为 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ 、湿度为40%~60%的环境。然后放入低温环境($-197 \sim -40^\circ\text{C}$)48~52h,试件抗压强度还可以继续增长。由于持续的冻结作用,处于低温环境的混凝土试件随着温度降低,其抗压强度反而略有增长,因此,同强度等级的混凝土在低温环境中随着温度的降低,其轴心抗压强度标准值反而增大(详见GB 51081—2015表4.1.2-1和表4.1.2-2)。例如C40混凝土在常温环境的轴心抗压强度标准值为 26.8 N/mm^2 ,温度从 -40°C 降到 -197°C 时,其轴心抗压强度标准值反而从 28.0 N/mm^2 增大到 36.6 N/mm^2 。与此相反,建筑钢材在负温环境下,随着温度降低,其力学性能急剧衰减,甚至发生脆性破坏。

混凝土不怕冻结和严寒,但是冻融循环则可能导致混凝土力学性能严重劣化,因此,混凝土的抗冻性是指其抵御冻融循环的能力。水结冰和冰融化等物理现象对土木工程材料的物理力学性能具有显著影响。混凝土冻融循环破坏,可以简单地解释为水结冰膨胀产生的结晶压力使混凝土毛细孔破坏,从而导致混凝土力学性能逐渐劣化。混凝土结构服役过程中,主要是期望混凝土经受多次冻融循环作用后不会被破坏,其抗压强度也不会明显降低。

随着温度的变化,物质的体积也会产生相应的变化,例如常说的热胀冷缩。实际上,热胀冷缩等基本物理常识都有其适用范围,例如一些物质随着温度升高表现出热缩冷胀,或者只在一定温度范围内为热胀冷缩,而在其他温度范围内表现为热缩冷胀,例如水在 $0 \sim 4^\circ\text{C}$ 时表现为冷胀热缩,此外还有铋、铊等元素以及镍酸铋(BiNiO_3)和镍酸铅(PbNiO_3)等物质,也会出现热缩冷胀现象。因此,学习材料的基础概念时,不能将物理化学的基本概念固化,更不能将普通物理化学中的所有概念都看作绝对的公理。

1.3 材料的力学性质

■1) 材料的强度和强度等级

强度表征材料抵抗外力破坏的能力,是表征结构材料力学性能的重要指标,因此,必须熟练掌握强度计算公式。强度等级是结构材料力学性能的设计取值,是用统计方法对强度测试值进行统计分析并考虑安全冗余后得到的材料力学性能的设计标准值,例如HRB400级钢筋的抗拉屈服强度实测值可以达到500MPa,但考虑到安全冗余,HRB400级钢筋的设计值取其屈服强度400MPa。

■2) 材料的弹性和塑性

材料的弹性和塑性是针对材料受力时产生的变形是否能够恢复而言的,通常认为同类材料的塑性变形越大其韧性越好。钢材的塑性与其强度和元素含量等有关,对于同品种钢材,随着强度等级的提高,其塑性稍有降低。建筑钢材种类繁多,对于常用的热轧钢筋,随着强度等级提高,其断后伸长率稍有降低。例如HPB300级钢筋的断后伸长率实测值可达30%~35%,而HRB500E级钢筋的断后伸长率实测值为25%~30%,表现为高强度等级的热轧钢筋的塑性或韧性比低强度等级热轧钢筋的塑性或韧性稍差。当荷载较小时,建筑钢材的变形主要为可恢复的弹性变形,当荷载超过屈服强度后产生的形变主要为不可恢复的塑性变形。

■ 3) 弹性模量

弹性模量的一般定义是:单向应力状态下应力除以该方向的应变。因此,弹性模量可以表述为材料在外力作用下抵抗变形的能力。

材料在弹性变形阶段,其应力和应变成正比例关系,即符合胡克定律,其比例系数称为弹性模量。弹性模量是描述物质弹性的物理量,是一系列变形模量的统称,包含“杨氏模量”“剪切模量”“体积模量”等。杨氏模量通常是指材料在拉伸作用下抵抗变形的能力,因此,又称为拉伸模量。

■ 4) 材料的脆性和韧性

材料的脆性和韧性是针对材料被破坏时是否产生明显变形而言的,材料被破坏时没有明显的塑性变形则称为脆性材料;材料被破坏时有明显的塑性变形则称为韧性材料。脆性和韧性主要表征材料被破坏时的塑性变形大小。对于相同的材料,随着强度等级的增大,通常表现为韧性降低,例如高强混凝土和高强钢破坏时,其塑性变形随着强度等级的增大而逐渐降低。对于不同类型的材料,不能通过强度大小来判断其是脆性材料还是韧性材料。

混凝土受力破坏过程的变形较为复杂,同时存在弹性变形和塑性变形,因此也可以说混凝土是弹塑性材料。通常认为,混凝土受力时弹性变形较小,塑性较差,尤其是高强混凝土,属于脆性材料,但是通过掺加纤维等增韧材料,混凝土也可以表现出良好的韧性,因此,混凝土的弹塑性本构关系比钢材的更复杂。

掺加钢纤维或者具有高弹性模量的聚乙烯醇纤维,水泥基复合材料也可以具有良好的韧性,例如超高韧性水泥基复合材料(UHTCC),也称为工程水泥基复合材料(ECC)。普通混凝土无侧限受压破坏时的塑性变形通常为 $0.33\% \sim 0.7\%$,但是UHTCC的无侧限受压破坏时塑性变形可以达到 3.0% ,而单轴受拉破坏时的塑性变形甚至可以达到 $6.0\% \sim 7.0\%$ 。新型结构材料的研究日新月异,对传统的结构设计方法和结构设计原理提出了挑战。

1.4 土木工程材料的耐久性

■ 1) 耐久性

材料在长期使用过程中,保持其原有性能不变质、不破坏的性质称为耐久性。耐久性是反映材料综合性能的概念,包括抗冻性、抗渗性、耐腐蚀性、抗老化性、耐热性和耐磨性等诸多性能指标。提高材料耐久性,对保证基础设施长期处于正常使用状态、减少维护费用、延长使用年限、节约材料等具有十分重要的意义。

影响材料耐久性(长期使用性能)的因素包括外部环境条件、服役状态和材料内在因素。其中内在因素主要有:①材料的化学成分和矿物成分。如果材料的化学成分或者矿物成分容易与酸、碱、盐等化学物质发生反应,或者材料包含易溶于水或某些溶剂的成分,则材料的耐腐蚀性能较差。②晶体结构和结晶状态。化学组成相同时,晶体材料的抗腐蚀性比非晶体材料好,这主要是由于非晶体材料的化学能较高,化学稳定性较差。③材料的孔隙率,尤其是开口孔隙率。材料的开口孔隙率越高,侵蚀性物质越容易进入材料内部,从而加剧材料腐蚀。可以通过改变材料组成、晶体结构,提高密实度和增加材料表面保护层厚度来改善材料耐久

性。④材料的孔隙结构。仅用孔隙率无法准确反映材料孔隙的孔径分布和孔隙状态,孔隙结构包含孔径分布和孔隙开闭及连通状态。孔隙率相同,但是孔的数量更多、平均孔径更小的材料,其抗渗性通常更好。以混凝土为例,为了提高混凝土抗冻性,反而需要适度提高混凝土含气量。添加引气剂,虽然混凝土孔隙率增大,但是形成了更多的封闭微孔,有利于提高混凝土抗冻性。

根据中国工程院吴中伟院士提出的分类方法,孔径小于 20 nm 的孔为无害孔,孔径为 20 ~ 50 nm 的孔为少害孔,孔径为 50 ~ 200 nm 的孔为有害孔,孔径大于 200 nm 的孔为多害孔。如果混凝土中孔隙的孔径均小于 50 nm 且为封闭孔,将会显著提高混凝土耐久性,甚至可以提高混凝土力学性能。

此外,材料的耐久性与其外部环境条件和服役状态密切相关。以水泥混凝土为例,在常温的中强碱溶液(饱和氢氧化钙溶液或饱和石灰水)中养护混凝土,其抗压强度会持续增长;但是,如果在常温的强碱溶液(饱和氢氧化钠溶液)中养护混凝土,其抗压强度会逐渐降低。水泥混凝土属于碱性物质,其耐酸性相对较差。此外,材料的耐久性与其服役状态相关,例如荷载大小或者应力状态也会显著影响材料的耐久性。材料、机械零件或构件在恒应力(主要是拉应力)和腐蚀介质的共同作用下产生的失效现象称为应力腐蚀。高应力状态下,材料应力腐蚀进程会明显加速。

■ 2) 材料耐久性和强度的相关性

通常认为材料的强度越高,耐久性越好,或者说耐久性好的材料应该具有更高的强度。实际上,高强度并不是材料耐久性良好的充分必要条件。强度与耐久性的关系是学习过程中容易误解的概念。通常认为的强度越高则耐久性越好,实质上是指随着材料强度的增大,其密实度越高,孔隙率更低,从而表现出更好的耐久性。

仍然以水泥混凝土为例,吴中伟院士认为,高性能混凝土是以耐久性为主要目标进行设计的混凝土,是以优异的耐久性,而不是高强度为主要特征。可以说,低强度等级的混凝土也可以做成高性能,并具备优异的耐久性。一些跨海大桥的桥墩所用的混凝土,90 d 抗压强度设计值仅为 20 ~ 35 MPa,但依然可以满足设计使用寿命 100 ~ 120 年的耐久性要求。但是,实际工程中,受技术水平和原材料质量等因素的限制,工程技术人员难以制备出低强度等级的高耐久性混凝土,只好通过提高混凝土强度等级来满足耐久性要求,从而陷入了混凝土强度等级越高耐久性越好的误区,造成了不必要的材料浪费。

以建筑钢材和铸铁为例,常用建筑钢材的强度通常高于普通的铸铁,但是普通铸铁的耐久性在很多环境条件下要优于建筑钢材。钢材的耐腐蚀性主要与其化学组成和组织特征有关,即使是同种钢材,也不能简单地用强度等级的高低来判断耐久性的优劣。

延长实际结构的健康服役寿命,不仅需要按照相关的标准采用满足耐久性要求的材料,还需要正确理解侵蚀介质影响材料耐久性的机理,并采取合理的防护措施。

☆ 标准体系

《国务院关于印发深化标准化工作改革方案的通知》(国发[2015]13号)指出,政府主导制定的标准由 6 类整合精简为 4 类,分别是强制性国家标准(GB)和推荐性国家标准(GB/T)、推荐性行业标准(JGJ/T,JC/T,CJJ/T)、推荐性地方标准(DB/T);市场自主制定的标准分为团体标准和企业标准。政府主导制定的标准侧重于保基本,市场自主制定的标准侧重于提高竞争力。同时还应建立完善的、与新型标准体系配套的标准化管理体制。

建设工程领域的团体标准,例如中国工程建设标准化协会(CECS)标准,也是我国标准体系的重要组成部分。

◆ 本章习题

一、单项选择题

- (1)材料在绝对密实状态下,单位体积的质量称为()。
- A. 密实度 B. 表观密度 C. 密度 D. 堆积密度
- (2)材料在自然状态下,单位体积的质量称为()。
- A. 密实度 B. 表观密度 C. 密度 D. 体积密度
- (3)材料体积内被固体物质充实的程度称为()。
- A. 密实度 B. 表观密度 C. 密度 D. 堆密度
- (4)散粒材料堆积体积内,颗粒之间的空隙体积所占的比例称为()。
- A. 孔隙率 B. 空隙率 C. 密实度 D. 填充率
- (5)材料与水接触时能被水润湿的性质称为()。
- A. 吸水性 B. 吸湿性 C. 亲水性 D. 憎水性
- (6)材料在水中通过毛细孔隙吸收并保持水分的性质,用()表示。
- A. 吸水性 B. 吸水率 C. 亲水性 D. 憎水性
- (7)材料抵抗水破坏作用的性质称为耐水性,用()表示。
- A. 吸水性 B. 吸水率 C. 软化系数 D. 渗透系数
- (8)材料在长期使用过程中,抵抗各种自然因素及有害介质的作用,保持其()不变质和不被破坏的能力称为材料的耐久性。
- A. 表面状态 B. 表观密度 C. 原有性能 D. 力学性能
- (9)材料在外力作用下产生变形,当外力取消后,变形()的性质称为弹性。
- A. 逐渐增大 B. 逐渐降低 C. 保持不变 D. 完全消失
- (10)材料在外力作用下产生变形,当外力取消后,仍保持变形后的形状,并不产生()的性质称为塑性。
- A. 裂缝 B. 弯曲 C. 变形 D. 拉伸
- (11)材料在冲击、震动荷载作用下,能够吸收(),同时也能产生一定变形而不被破坏的性质称为韧性或冲击韧性。
- A. 较大的变形 B. 外界的能量 C. 内部的能量 D. 较大的能量
- (12)我国建筑材料的技术标准主要有国家标准、()、地方标准和团体标准等。
- A. 建材标准 B. 行业标准 C. 水泥标准 D. 建筑标准
- (13)材料在微观结构层次上可以分为晶体、玻璃体和()三类。
- A. 复合材料 B. 非金属 C. 金属 D. 胶体
- (14)材料按化学成分可以分为无机材料、有机材料和()三大类。
- A. 复合材料 B. 非金属 C. 金属 D. 聚合物
- (15)材料的孔隙状况由孔隙率、()、连通状态3个指标说明。
- A. 孔径分布 B. 开口孔 C. 闭口孔 D. 孔隙形貌
- (16)材料内部的(),可以分为连通与封闭两种。

A. 微孔 B. 开口孔 C. 孔隙率 D. 孔隙构造

(17) 某材料的下列指标为常数的是()。

A. 密度 B. 表观密度 C. 导热系数 D. 强度

(18) 受水浸泡或长期处于潮湿环境中的重要结构材料,其软化系数应不小于()。

A. 0.5 B. 0.75 C. 0.85 D. 1

(19) 材料在一定温度和湿度下吸附水分的能力称为()。

A. 耐水性 B. 吸湿性 C. 吸水性 D. 渗透性

二、判断题

(1) 多孔材料的孔隙率等于体积吸水率。 ()

(2) 随着材料孔隙率的提高,其吸水率必然增大。 ()

(3) 材料的平衡含水率随环境温度和湿度变化。 ()

(4) 渗透系数越大,表示材料的抗渗性越好。 ()

(5) 材料的吸湿作用是不可逆的。 ()

三、计算题

(1) 已知某材料干燥状态时的破坏荷载为 240 kN,饱水时的破坏荷载为 180 kN,问该材料是否适合用作长期与水接触的工程部位结构材料。

(2) 某材料的体积吸水率为 10%,密度为 3.0 g/cm^3 ,绝干时的表观密度为 1500 kg/m^3 。试求该材料的质量吸水率、开口孔隙率、闭口孔隙率。

(3) 某岩石的密度为 2.75 g/cm^3 ,孔隙率为 1.5%,今将该岩石破碎为碎石,测得碎石的堆密度为 1560 kg/m^3 。试求此岩石的表观密度和碎石的空隙率。

(4) 组成相同的甲、乙种两墙体材料密度均为 2.7 g/cm^3 。甲材料的干表观密度为 1400 kg/m^3 ,质量吸水率为 17%;乙材料吸水饱和后的表观密度为 1862 kg/m^3 ,体积吸水率为 46.2%。试求:①甲材料的孔隙率和体积吸水率;②乙材料的干表观密度和孔隙率;③甲、乙两材料哪种更适合用作外墙材料,说明依据。

(5) 砂和石子的表观密度是混凝土配合比设计的重要参数,取某批碎石试样 2 个,用玻璃广口瓶测试其近似密度 ρ' 。步骤如下:

① 称取烘干试样 1000 g (m_0),装入盛有半瓶水的广口瓶(容量 1000 mL)中;

② 摇转广口瓶,使试样在水中充分搅动以排除气泡,塞紧瓶塞,静置 24 h;然后打开瓶塞,用滴管添水使水面与瓶颈刻度线齐平,塞紧瓶塞,擦干瓶外水分,称其质量 m_1 (g),精确至 1 g;

③ 倒出广口瓶中的水和试样,洗净瓶内外,再注入与②水温相差不超过 $2 \text{ }^\circ\text{C}$ (并在 $15 \sim 25 \text{ }^\circ\text{C}$) 的冷开水至瓶颈刻度线,塞紧瓶塞,擦干容量瓶外壁水分,称其质量 m_2 (g),精确至 1 g。

试样干质量及浸水 24 h 后称量数据如下表,计算碎石近似密度(精确至 0.001 g/cm^3)。

次数	试样干质量 m_0/g	碎石 + 水 + 瓶重 m_1/g	水 + 瓶重 m_2/g	集料体积 V/cm^3	近似密度 ρ'	近似密度平均值 $\bar{\rho}'$
1	1000	2378	1750	372		
2	1000	2328	1703	375		