



普通高等教育土建类规划教材

土木工程 材料

● 周爱军 张玫 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育土建类规划教材

土 木 工 程 材 料

主 编	周爱军	张 玫		
副主编	周建萍	王 琨		
参 编	潘志忠	庄 宇	郑秀梅	陈古庭
主 审	刘 波			

机 械 工 业 出 版 社

前 言

土木工程材料是土木工程专业学生必修的一门专业基础课,该课程的任务是使学生具有土木工程材料的基本知识,熟悉和掌握常用土木工程材料的性质及其应用,为学习后续的专业课打好基础。

本书以全国高等学校土木工程专业教学指导委员会制定的“土木工程材料教学大纲”为依据,主要介绍了常用土木工程材料的基本成分、原料及生产工艺、技术性质、工程应用、材料试验等基本理论及应用技术,并适当介绍了国内外土木工程材料的新成果、新技术。本书吸取同类教材的精华,重点把握教材的科学性、系统性和实用性。在内容的取舍上,注意突出土木工程常用材料和基本理论,删减了已过时或不太常用的一部分传统材料,更新和补充了部分常用的新型材料,并全部采用我国的现行规范;对每一种土木工程材料的论述中,力求概念阐述准确,性能叙述条理清晰,并突出其实际应用。通过工程实例的简介,培养学生分析和解决实际问题的能力,以期达到培养应用型人才的目标。书后附有常用土木工程材料词汇中英文对照表,供双语教学和阅读国外文献参照用。

全书共10章,包括绪论、土木工程材料的基本性质、无机胶凝材料、水泥混凝土和砂浆、石料和砌筑材料、沥青材料、沥青混合料、建筑钢材、合成高分子材料、建筑功能材料和土木工程材料试验。参加本书编写的均是富有丰富教学、科研和工程实践经验的教师,编写分工为:绪论、第2章和附录由鲁东大学周爱军编写并负责全书统稿;第1章、第4章和试验6由佳木斯大学潘志忠编写;第3章由佳木斯大学张玫编写;第5章由云南农业大学周建萍编写;第6章由山东交通学院王琨编写;第7章和试验7、8、10由佳木斯大学郑秀梅编写;第8章和第9章由佳木斯大学庄宇编写;试验1~5、试验9由云南农业大学陈古庭编写。中国矿业大学(北京)刘波教授审阅了书稿,并提出了许多建设性的意见和建议,在此深表感谢。

近几年来我国土木工程新材料、新品种不断涌现,因此本书未能涵盖所有的土木工程材料。同时由于编者水平所限,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正,编者联系方式Ldzhaj6b@sina.com。

编 者

目 录

前言

绪论	1
【本章内容导读】	1
0.1 课程简介	1
0.2 土木工程材料的分类	1
0.3 土木工程与材料的关系	2
0.4 土木工程材料的发展	3
0.5 土木工程材料的技术标准	4
0.6 本课程的学习目的、特点和 学习方法	6
第1章 土木工程材料的基本性质	8
【本章内容导读】	8
1.1 材料的组成、结构与构造	8
1.2 材料的物理性质	11
1.3 材料的热工性质	17
1.4 材料的力学性质	20
1.5 材料的化学性质和装饰性	23
1.6 材料的耐久性	24
【工程实例分析】	25
【创新与实践】	25
复习思考题	25
第2章 无机胶凝材料	27
【本章内容导读】	27
2.1 胶凝材料简介	27
2.2 气硬性胶凝材料	27
2.3 通用硅酸盐水泥	37
2.4 其他品种水泥	57
【工程实例分析】	67
【创新与实践】	68
复习思考题	68
第3章 水泥混凝土和砂浆	70
【本章内容导读】	70
3.1 概述	70
3.2 普通混凝土的组成材料	73
3.3 新拌混凝土的性能	94
3.4 混凝土的力学性能	99
3.5 混凝土的变形性能	107

3.6 混凝土的耐久性	111
3.7 混凝土的质量控制与强度评定	118
3.8 普通混凝土配合比设计	122
3.9 水泥混凝土技术进展	132
3.10 砂浆	140
【工程实例分析】	151
【创新与实践】	151
复习思考题	151
第4章 石料和砌筑材料	153
【本章内容导读】	153
4.1 石料	153
4.2 砌筑材料	162
【工程实例分析】	176
【创新与实践】	176
复习思考题	177
第5章 沥青材料	178
【本章内容导读】	178
5.1 沥青	178
5.2 沥青基防水材料	195
【工程实例分析】	204
【创新与实践】	205
复习思考题	205
第6章 沥青混合料	206
【本章内容导读】	206
6.1 概述	206
6.2 沥青混合料组成材料的技术要求	209
6.3 热拌沥青混合料的组成结构与 强度原理	213
6.4 沥青混合料的技术性质和技术标准	218
6.5 热拌沥青混合料的配合比设计	223
6.6 沥青玛蹄脂碎石混合料	240
【工程实例分析】	243
【创新与实践】	244
复习思考题	245
第7章 建筑钢材	247
【本章内容导读】	247
7.1 钢材的冶炼与分类	247

7.2 钢材的主要技术性能	250	9.3 吸声隔声材料	305
7.3 钢材的化学成分及其对性能的影响 ...	255	9.4 建筑功能材料的新发展	308
7.4 钢材的冷加工及热处理	257	【工程实例分析】	309
7.5 钢材的品种与选用	258	【创新与实践】	309
7.6 钢材的腐蚀与防护	267	复习思考题	310
【工程实例分析】	268	第10章 土木工程材料试验	311
【创新与实践】	269	10.1 土木工程材料基本物理性质试验	311
复习思考题	269	10.2 水泥试验	314
第8章 合成高分子材料	270	10.3 集料试验	327
【本章内容导读】	270	10.4 普通混凝土试验	342
8.1 高分子材料的基本知识	270	10.5 砂浆试验	350
8.2 常用的工程高分子材料	273	10.6 石料和砌墙砖试验	353
8.3 高分子材料在土木工程中的应用	279	10.7 沥青试验	359
【工程实例分析】	289	10.8 沥青混合料试验	365
【创新与实践】	290	10.9 建筑钢材试验	375
复习思考题	290	10.10 综合设计试验	379
第9章 建筑功能材料	291	附录 常用土木工程材料词汇中英	
【本章内容导读】	291	文对照表	382
9.1 建筑装饰材料	291	参考文献	402
9.2 保温隔热材料	301		

绪 论

【本章内容导读】

1. 讲述内容：土木工程材料是土木工程类专业的一门专业基础课，绪论中主要介绍土木工程材料的分类，土木工程材料在土木工程中的地位和作用，土木工程材料的发展趋势，土木工程材料的标准化以及本课程的特点、学习任务和方法。通过列举古今中外的工程实例，激发学生对本门课程的学习兴趣。

2. 学习重点和要求：通过绪论的学习，能够理解土木工程材料在专业类学习中的重要性，了解土木工程材料的发展历程、未来发展趋势、在工程建设中的地位与作用，明确这门课的学习特点和学习方法，掌握土木工程材料的分类和标准化。

0.1 课程简介

土木工程材料是土木工程专业类学生必修的一门专业基础课，是研究土木工程用材料的组成与构造、技术性能、技术标准、检验方法及其应用的一门学科。它与物理、化学、材料力学、工程地质等课程有密切关系。本课程的教学目的是使学生具有土木工程材料的基本知识，在进行土木工程专业设计、施工和管理时能正确选择和合理使用土木工程材料，并为后续相关专业课程的学习打好基础。

0.2 土木工程材料的分类

土木工程材料是指建造各种土木工程建筑物或构筑物所使用的各种材料及制品，它是土木工程的基石。如水利工程、房屋建筑、道路工程、桥梁工程、港口工程、隧道工程、矿山建设工程等所用的建筑材料都属于土木工程材料的范畴。我们常见的比较熟悉的土木工程材料有砂石、石灰、水泥、混凝土、沥青、钢筋、瓷砖等，实际工程中的土木工程材料远不止这些，其品种门类繁多，性能也各不相同，为了便于使用和研究，首先要搞清土木工程材料的分类。

土木工程材料可按不同原则进行分类。按使用功能不同，土木工程材料可分为结构材料、防水材料、装饰材料、功能（声、光、电、热、磁等）材料等；按材料在土木工程结构中的使用部位不同，可分为主体结构材料、墙体材料、屋面材料、地面材料、饰面材料等。

目前，最常用的分类方法是按照材料的化学成分分类，可分为无机材料、有机材料和复合材料三大类，详见表 0-1。

表 0-1 土木工程材料的分类

无机材料	金属材料	黑色金属：铁、钢等
		有色金属：铜、铝及其合金等
	非金属材料	天然砂石材料：砂、石及各种石材制品等
		胶凝材料：石灰、石膏、水泥、水玻璃等
		烧结制品：砖、瓦、玻璃、陶瓷等
		混凝土、砂浆
		硅酸盐制品：灰砂砖、加气混凝土、混凝土砌块等
有机材料	植物材料	木材、竹材等
	沥青材料	石油沥青、煤沥青等
	高分子材料	塑料、合成橡胶、有机涂料、胶粘剂等
复合材料	金属与无机非金属材料复合	钢筋混凝土、钢纤维混凝土等
	有机与无机非金属材料复合	玻璃纤维增强塑料（玻璃钢）、聚合物混凝土、沥青混凝土等
	金属材料与有机材料复合	塑钢、轻质金属夹芯板

0.3 土木工程与材料的关系

在土木工程建设中，材料占有重要地位，工程与材料之间存在着密切的关系，主要体现在以下几方面：

(1) 土木工程材料是一切土木工程的重要物质基础 任何一种建筑物或构筑物都是用土木工程材料按某种方式建造而成的，没有土木工程材料做物质基础，各类建设项目就无法顺利建成。由于土木工程材料的用量很大，故在一般土木工程的总造价中，与材料有关的费用大约占工程总投资的 30% ~ 50%，重要工程可占到 70% ~ 80%，所以，材料的价格直接影响到土木工程的投资。如何从品种繁多的材料中选择质优价廉的土木工程材料，对降低工程造价具有重要意义。除此以外，材料的合理使用及管理，对工程成本也有很大的影响。

(2) 土木工程材料与建筑结构和施工存在相互促进、相互依存的关系 改革开放以来，我国土木工程的规模日趋扩大，出现了许多新的结构形式和施工方法，功能要求也越来越多，这就对土木工程材料提出了越来越高的要求，从而促进了土木工程材料的迅速发展。土木工程中许多技术问题的解决，也往往依赖于在土木工程材料方面有所突破。例如，现代高层建筑、大跨度结构、预应力结构的大量应用，要求提供更高强度的混凝土和钢材，以减小构件截面尺寸，减小结构自重；化学工厂、港口和海洋工程，需要使用耐蚀材料；节能建筑需要高效保温隔热材料等。而一种新型土木工程材料的出现，必将促进结构形式的创新，同时结构设计和施工技术也将相应改进和提高。例如，钢材及水泥的大量应用和性能改进，使得钢筋混凝土结构已占领了土木工程的主导地位；随着我国经济水平的发展和钢材产量的提高，钢结构目前也已成为土木工程的主要结构形式之一。这些结构形式逐渐取代了传统的

砖、石、木结构。当前,轻质高强材料的应用,推动了现代建筑向高层和大跨度方向发展;新型节能型建材的推广应用,也推动了节能建筑的发展。

土木工程材料的质量优劣直接影响着土木工程的质量。材料的品种规格及质量和性能,在很大程度上决定着土木工程的坚固、耐久、适用、美观、经济及其使用寿命。如混凝土结构的质量首先取决于混凝土各组成材料的质量、混凝土的强度和密实性等方面。再如,钢材的锈蚀、混凝土的劣化等会直接影响到钢筋混凝土结构物的整体性能。国内外土木工程建设中的质量事故,很多都与材料的质量缺损有关。

综上所述,土木工程材料是土木工程的基础和核心,作为土木工程专业的学生,必须熟悉土木工程材料的品种和性质,掌握这些性质的变化规律,善于在不同的工程和使用条件下加以合理利用,从而为将来从事土木工程的设计、施工和管理打下良好的基础。

0.4 土木工程材料的发展

1. 土木工程材料的发展概况

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,并经历了大致三个发展阶段。

(1) 使用天然材料阶段 远古时代的人们最初居于天然山洞或树巢中,依靠大自然提供的天然条件抵御风寒和野兽的袭击,即所谓“穴居巢处”。后来进入石器、铁器时代,能够利用简单的工具挖土、凿石为洞,伐木、搭竹为棚,并学会了简单地利用稍经加工的天然材料——土、石、竹、木,比天然巢穴进了一步。

(2) 生产烧土制品阶段 随后人们学会了用黏土烧制砖、瓦,用岩石烧制石灰、石膏。与此同时,木材的加工技术和金属的冶炼与应用也有了相应的发展。这时,土木工程材料才由天然材料进入到人工生产阶段,为较大规模地建造建筑物和构筑物奠定了基本条件。砖石、砖木结构是这一时期的主要特征。如体现我国古代建筑工程高度成就的万里长城,总长度有5万多千米,所用建筑材料包括土、石、木料、砖、石灰。但在漫长的封建社会中,生产力发展缓慢,土木工程材料发展也很缓慢,长期停留在“秦砖汉瓦”的水平上,使用的材料不过砖、石和木而已。

(3) 钢筋混凝土兴起并壮大阶段 随着资本主义的兴起,工商业发展迅速,城市规模日益扩大,交通运输日益发达,需要建造大跨度厂房、高层建筑、大型公共建筑、桥梁、港口码头等更大规模、更高质量的土木工程建筑物和构筑物。而原有的土木工程材料在数量和质量上都无法满足新的建设要求,这就促使土木工程材料在其他有关科学技术的推动下,进入了一个新的发展阶段。十八、十九世纪,水泥、混凝土、钢材相继发明出现,成为这一时期主要应用的土木工程材料,钢筋混凝土结构和预应力结构也应运而生。进入20世纪后,随着社会生产力的突飞猛进和科学技术的进步,以及材料科学的形成与发展,一大批新型土木工程材料也相继发展起来,并在材料的品种、性能和质量方面都得到了很大的改善和提高。以有机材料为主的化学建材异军突起,一些特殊功能的新型土木工程材料,如绝缘材料、耐磨、耐腐蚀材料、防爆、防辐射材料及其他环保材料等都相继应用在土木工程中。

综上所述,在现代土木工程中,尽管传统的土、石等材料仍在基础工程中广泛使用,砖瓦、木材等传统材料在工程的某些方面也有一定应用,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越来越重要的位置。

2. 土木工程材料的发展趋势

由于土木工程材料行业对资源的利用和对环境的影响在国民经济中都占据着重要的位置,为了顺应全球对环境保护和节能降耗的要求,避免新型建筑材料的生产和发展对环境造成危害,进入21世纪以后,对土木工程材料提出了更高、更多的要求,其未来的发展具有以下几个方向:

(1) 充分利用再生资源和废料 目前我国工农业废渣和生活垃圾年产量约320亿吨,通过回收利用再生资源和工农业废渣,替代自然资源为原料生产新型建材,不仅可减少环境污染和资源浪费,更重要的是可实现经济、环境的可持续发展。

(2) 降低能耗,发展节能型新型材料 土木工程材料的生产能耗和建筑物使用能耗,在国家总能耗中一般占20%~35%,研制和生产低能耗的新型节能土木工程材料,是构建节约型社会的需要。通过改造或淘汰陈旧设备,降低原材料和能源消耗,可以减小地球和生态系统的负荷,减少环境污染。发展能源节约型建材就是要发展节能型新型材料,如低辐射镀膜玻璃、太阳能发电材料、高性能保温隔热材料等。

(3) 高性能化 高性能建材是指比现有材料的性能更为优异的建筑材料,如轻质、高强、高耐久性、高抗震性等。由于当前常用的钢筋混凝土结构材料自重较大,限制了建筑物向高层、大跨度方向进一步发展。故通过减小土木工程材料的自重,以尽量减小结构物的自重,同时提高材料和结构物的强度,可提高经济效益。目前,世界各国都在大力发展高强混凝土、加气混凝土、轻骨料混凝土、空心砖、石膏板等材料,以适应土木工程发展的需要。随着经济的发展,各类投资巨大的大型工程日益增多,人们对耐久性的要求也日益提高,要求未来的土木工程材料具有较高的耐久性,有较高的预期寿命,能够长时间使用而不改变其原有性能。

(4) 多功能化 要求材料具有多种功能,既是承重材料,又是维护材料,还具有良好的保温、隔热、隔声等功能,如多功能玻璃可起到装饰、隔声、吸热、防辐射、单面透光等作用。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,这对提高建筑物的使用功能、经济性 & 提高施工速度等有着十分重要的作用。如将纳米技术与建筑材料结合,可开发出具有光催化性、抗菌、除臭、消毒等功能的生态建筑材料。

(5) 智能化 所谓智能化材料,是指材料本身具有自我诊断、预告破坏和自我修复的自救功能,以及可重复利用性。土木工程材料向智能化方向发展,是人类社会向智能化发展过程中降低成本的需要。

(6) 生态化 21世纪土木工程材料的发展趋势是发展生态材料。生态建材有三个特点:一是与环境的协调性,在制造、使用、废弃、再生的整个生命周期中具有与生态环境的协调性,具有净化环境和修复环境的功能;二是先进性,具有优异的使用性能;三是舒适性,有益于人体的健康,能够提高人们的生活质量。

0.5 土木工程材料的技术标准

土木工程中使用的各种材料及其制品种类繁多,其应具有满足使用功能和所处环境要求

的某些性能，这些性能或质量指标必须满足由专门机构制定并颁发的技术标准的要求。土木工程材料的技术标准主要是对产品规格、质量、分类、技术要求、验收规则、检验方法等所作的技术规定。目前我国大多数土木工程材料都有相应的技术标准。技术标准是产品质量的技术依据，生产企业必须按标准生产合格产品；使用者应按标准选用材料、按规范进行工程的设计与施工，以保证工程的优质、高速、低成本。同时，技术标准还是供需双方对产品进行质量检查、验收的依据。

目前，我国常用的标准按适用领域和有效范围，分为国家标准、行业标准、地方标准和企业标准，共四级。技术标准的表示方法由标准名称、部门代号（以汉语拼音字母表示）、标准编号、颁发年份组成。

1. 国家标准

国家标准是指对全国经济技术发展有重大意义、必须在全国范围内统一的标准，简称国标。国家标准由国务院有关主管部门（或专业标准化技术委员会）提出草案、报国家标准总局审批和发布。国家标准分为强制性标准和推荐性标准。

如以“GB 175—2007《通用硅酸盐水泥》”为例，该标准为强制性国家标准，任何技术（产品）不得低于此标准。其中“GB”为国家标准的代号，“175”为标准编号，“2007”为标准颁布年代号，“通用硅酸盐水泥”为该标准的技术（产品）名称。此外，“GB/T”为推荐性国家标准代号，它表示也可以执行其他标准，是非强制性的，如 GB/T 17671—1999《水泥胶砂强度检验方法》。

有关工程建设方面的技术标准的代号，应在部门代号后加 J。如 GBJ 为国家工程建设标准的代号。

另外，我国土木工程协会标准（代号 CECS）也是全国推荐标准，它具有前瞻性和引导性。

2. 行业标准

行业标准是专业产品的技术标准，主要是指全国性各专业范围内统一的标准，简称“行标”。这种标准由国务院所属各部和总局组织制定、审批和发布，并报送国家标准总局备案。

如“JC/T 479—1992《建筑生石灰》”，其中“JC”为建材行业的标准代号，“T”表示推荐标准；“479”为此类技术标准的二类类目顺序号；“1992”为标准颁发年代号。

某些行业标准代号见表 0-2。

表 0-2 部分行业标准代号

行业名称	标准代号	行业名称	标准代号
建材行业	JC	石化行业	SH
建工行业	JG	交通行业	JT
冶金行业	YJ	水利行业	SL

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 DB。

4. 企业标准

凡没有制定国家标准、行业标准的产品或工程，都要制定企业标准。这种标准是指仅限

于企业范围内适用的技术标准，简称“企标”，代号 QB。为了不断提高产品或工程质量，企业可以制定比国家标准或行业标准更先进的产品质量标准。

随着建筑材料科研及生产的发展，建筑材料技术标准也不断变化。根据需要国家每年都发布一批新的技术标准，修订或废止一些旧的标准，并逐步与国际标准相接轨。

与土木工程材料密切相关的国际标准大致有以下几类：

团体标准和公司标准——指国际上有影响的团体和公司的标准，如美国材料试验协会标准（ASTM）等。

区域性标准——如德国工业标准，代号为 DIN；日本工业标准，代号为 JIS；英国标准，代号为 BS；法国标准，代号为 NF 等。

国际标准化组织标准——代号 ISO。

0.6 本课程的学习目的、特点和学习方法

1. 本课程的学习目的

本课程学习目的在于使学生掌握主要土木工程材料的性质、用途、使用方法以及检测和质量控制方法，并了解土木工程材料的性质与组成和构造的关系，以及性能改善的途径等。通过本课程的学习，应能针对不同工程合理选用材料，并能与后续课程密切配合，了解材料与设计参数及施工措施选择的相互关系。

2. 本课程的特点

与数学、力学等完全不同，本课程以叙述为主，涉及的专业名词、术语、概念比较多，而没有多少公式的推导或定律的论证与分析。由于土木工程材料品种繁多，故内容比较庞杂，各章之间的联系较少。本课程与工程实际联系紧密，有许多定性的描述或实践规律的总结。

3. 本课程的学习方法

初次学习这门课难免产生枯燥无味之感，但只要掌握了一定的学习方法，便能游刃有余，融会贯通。

（1）分析规律，抓住重点 本课程通过课堂教学，结合现行的技术标准，以土木工程材料的性能为核心，材料的选择与应用为重点，新材料和新技术为前沿，进行系统讲述。虽然这门课各章节之间自成体系，而每一章节中各土木工程材料所涉及的研究内容又很广泛，似乎无规律可循。但每种材料均有一条主线，包括从原材料、生产工艺、组成、结构和构造、性质及应用、检验及验收、运输及贮存等各个方面的内容。而这一系列内容中，应以土木工程材料的技术性质、质量检验及其在工程中的应用为学习的重点，其他内容都围绕这个重点来学习，并且材料的组成、结构、性质和应用之间有其内在的联系。学习中应注意材料的成分、结构和构造、生产过程等对其性能的影响，注意从材料的性质和应用范围来演绎出有关材料的检验、运输、验收、贮存方面的要求，也就是说要学会分析各项内容间的有机联系，而不能将它们变成一些孤立的概念。这样，每一章节的学习结束后，及时进行小结，便可使内容“由厚到薄”。

（2）理论与实际相联系 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。为了及时理解课堂讲授的知识，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，在实践中理解和验证所学内容，切忌死记硬背。

（3）积极参与，认真试验 本课程由理论课程、试验教学两大体系构成，实验课是本课程的重要教学环节。通过试验可验证所学的基本理论，学会检验常用建筑材料的试验方法，掌握一定的试验技能，并能对试验结果进行正确的分析和判断，这对培养学习与提高分析问题、解决问题的能力及严谨的科学态度十分有利。进行试验时，要严肃认真，一丝不苟。即使对一些操作简单的试验，也不应例外。要对试验数据、试验结果进行分析判别，培养从事科学研究的能力。

第1章 土木工程材料的基本性质

【本章内容导读】

1. 讲述内容：本章主要讲述土木工程材料的基本性质，包括基本物理性质、热工性质、力学性质、化学性质、装饰性、耐久性以及材料的组成、结构与构造等方面内容。

2. 学习重点和要求：要求学生重点熟悉和掌握土木工程材料的基本性质，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，以便在工程设计和施工中能够正确地选择和合理地使用各种材料。

土木工程材料在各种工程结构物中要承受各种不同的作用，要求其具有相应的不同性质。例如，结构材料主要受到各种外力的作用，因此，所选用的材料应具有所需要的力学性能。功能材料根据其所处的部位与环境不同应该具有防水、防腐、绝热、吸声等不同的性能。对于长期暴露于大气环境中的材料会受到干湿循环、化学侵蚀、冻融循环等作用，要求其具有良好的耐久性能。所以，学习和掌握土木工程材料的基本性质是正确选择和合理使用土木工程材料的基础。

1.1 材料的组成、结构与构造

1.1.1 材料的组成

材料的组成包括材料的化学组成、矿物组成和相组成，它们是决定材料物理、化学、力学性质和耐久性的最基本因素。

1. 化学组成 (Chemical composition)

化学组成是指构成材料的化学元素及化合物的种类和数量。当材料与外界物质相接触时，材料与所接触物质间必然要按照化学变化规律发生相互作用。例如钢材的锈蚀、材料的可燃性和耐火性、木材的腐蚀、混凝土的碳化及受到酸碱盐类物质的侵蚀等，都是由材料的化学组成决定的。

2. 矿物组成 (Mineral composition)

材料科学中常将具有特定的晶体结构、特定物理力学性能的组织结构称为矿物。矿物组成是指构成材料的矿物种类和数量。材料的矿物组成是决定材料性质的主要因素。如硅酸盐类水泥熟料的主要矿物组成为硅酸钙、铝酸钙、铁铝酸钙等，决定了水泥易水化成碱性凝胶体，并具有凝结硬化的性能，若其中硅酸三钙含量高，则其水泥硬化速度较快，强度较高；花岗岩的主要矿物组成为长石、石英和少量云母，酸性岩石多，决定了花岗岩的耐酸性好，但耐火性差；大理石的主要矿物组成为方解石、白云石，含有少量石英，因此大理石不耐酸腐蚀，酸雨会使大理石中的方解石腐蚀成石膏，致使石材表面失去光泽；石英砂的主要成分

是石英，如果其中含有玉髓、蛋白石，与高碱水泥同时使用时易发生碱-集料反应，降低水泥混凝土的耐久性。

3. 相组成 (Phase composition)

材料中结构相近、性质相同的均匀部分称为相。自然界中的物质可分为气相、液相、固相三种形态。材料中，同种化学物质由于加工工艺的不同，温度、压力等环境条件的不同，可形成不同的相。例如，在铁碳合金中就有铁素体、渗碳体、珠光体等。同种物质在不同的温度、压力等环境条件下，也常常会转变其存在状态，一般称为相变，如由气相转变为液相或固相。

由两相或两相以上的物质组成的材料为复合材料。例如，混凝土可以认为是由集料颗粒（集料相）分散在水泥浆体（基相）中所组成的两相复合材料。复合材料的性质与其构成材料的相组成和界面特性有密切关系。所谓界面是指多相材料中相与相之间的分界面。在实际材料中，界面是一个各种性能尤其是强度性能较薄弱的区域，它的成分和结构与相内的部分是不一样的，可作为“界面相”处理。因此，对于土木工程材料中的复合材料，可通过改变和控制其相组成和界面特性改善和提高材料的技术性能。

1.1.2 材料的结构与构造

材料的性能除与其组成成分有关外，还与其结构与构造有着密切的关系。其中，材料的结构一般分为宏观结构、细观结构和微观结构三个层次。

1. 宏观结构 (Macrostructure)

宏观结构通常是指用肉眼或低倍放大镜能够分辨的粗大组织，其尺寸在 10^{-3}m 级以上，是比毫米级还大的尺寸范围内的结构状况。土木工程材料的宏观结构，按其孔隙尺度可分为密实结构、多孔结构、微孔结构等；按构成形态可分为堆聚结构、纤维结构、层状结构、散粒结构等。

(1) 密实结构 密实结构是指在外观上和结构上都是致密而无孔隙存在（或孔隙极少）的结构。这类结构的材料具有吸水率低、抗渗和抗冻性较好、强度和硬度较高等性质，如金属材料、致密岩石和玻璃等。

(2) 多孔结构 多孔结构是指在材料中存在均匀分布的孤立或适当连通的粗大孔隙。这类结构的材料具有密度小、抗渗性和抗冻性较差、绝热性较好等特点，如加气混凝土、泡沫混凝土及泡沫塑料等。

(3) 微孔结构 微孔结构是指在材料中存在均匀分布的微孔隙。如石膏制品、低温烧结黏土制品等。这些材料在生产过程中由于水分蒸发或可燃性物质燃烧后形成微孔结构。

(4) 堆聚结构 堆聚结构是指由集料和胶凝材料结合而成的结构。如水泥混凝土、砂浆、沥青混合料等均属此类结构的材料。

(5) 纤维结构 纤维结构是指纤维状的物质结构，如木材、钢纤维、玻璃纤维、岩棉等。其在平行纤维方向和垂直纤维方向上的强度、导热性及其他一些性质明显不同，即各向异性。

(6) 层状结构 层状结构是天然形成或人工粘结等方法将材料叠合成的层状的结构。如胶合板、纸面石膏板、塑料贴面板等。层状结构材料各层性质不同，但叠合成层状结构后综合性质好，可以显著提高材料的强度、硬度、绝热性及装饰性等，扩大其使用范围。

(7) 散粒结构 散粒结构是指松散颗粒状结构。如混凝土用集料、陶粒、膨胀珍珠岩等。散粒材料颗粒间存在大量的空隙，可以用来拌制混凝土和用作绝热材料。

2. 细观结构 (Meso-structure)

细观结构 (又称亚微观结构) 是指用光学显微镜可以观察到的微米级的组织结构, 其尺寸范围在 $10^{-3} \sim 10^{-6} \text{m}$ 。在显微镜下人们主要研究材料内部晶粒的大小和形态、晶界或界面, 孔隙与微裂纹的大小、形状及分布。对于不同的土木工程材料, 其细观结构特征各不相同。对于水泥混凝土可分为基相、集料相、界面相等进行孔隙结构及界面结构分析, 对天然岩石可分为矿物、晶体颗粒、非晶体组织; 对钢材可分为铁素体、珠光体、渗碳体; 对木材可分为木纤维、导管、髓线、树脂道等显微组织。研究金属材料细观结构的方法称为金相分析。研究非金属材料 (岩石、水泥、陶瓷等) 细观结构的方法称为岩相分析。材料细观结构层次上各种组织的特征、数量、分布和界面性质对材料的性能有很大的影响。一般而言, 材料内部的晶粒越细小、分布越均匀, 则材料的强度越高、脆性越小; 晶粒或不同组成材料之间的界面粘结越好, 则材料的强度和耐久性越好。

3. 微观结构 (Microstructure)

微观结构是指用电子显微镜、扫描电子显微镜和 X 射线衍射仪等来进行研究分析的材料原子、分子层次的结构。其尺寸范围在 $10^{-6} \sim 10^{-10} \text{m}$ 。材料的许多物理、力学性质, 如强度、硬度、熔点、导热性、导电性等都是由材料的微观结构所决定的。微观结构按材料组成质点的空间排列或连接方式不同, 基本上可以分为晶体、玻璃体和胶体结构。

(1) 晶体 (Crystalline) 晶体的结构特征是其内部质点 (原子、离子、分子) 在空间上按特定的规则呈周期性的排列。晶体质点间键能的大小以及结合键的特性决定晶体材料的特性。根据组成晶体的质点及化学键的不同, 晶体可分为:

- 1) 原子晶体。中性原子以共价键而结合成的晶体, 如石英等。
- 2) 离子晶体。正负离子以离子键而结合成的晶体, 如 CaCl_2 等。
- 3) 分子晶体。以分子间的范德华力即分子键结合而成的晶体, 如有机化合物。
- 4) 金属晶体。以金属阳离子为晶格, 由自由电子与金属阳离子间的金属键结合而成的晶体, 如钢铁材料。

在复杂的晶体结构中, 其键结合的情况也是相当复杂的。在土木工程材料中占有重要地位的硅酸盐类材料, 其结构是由硅氧四面体单元 SiO_4 与其他金属离子结合而成, 其中就是由共价键与离子键交互构成的。 SiO_4 四面体可以形成链状结构, 如石棉。其纤维与纤维之间的键合力要比链状结构方向上的共价键弱得多, 所以容易分散成纤维状。黏土、云母、滑石等则是由 SiO_4 四面体单元互相连接成片状结构, 许多片状结构再叠合成层状结构。层与层之间是由范德华力结合的, 故其键合力很弱, 此种结构容易剥成薄片。石英是由 SiO_4 四面体形成的立体网状结构, 所以具有坚硬的质地。

(2) 玻璃体 (Vitreous body) 玻璃体是熔融物在急冷时, 质点来不及按一定规则排列而形成的内部质点无序排列的固体或固态液体。玻璃体结构的材料没有固定的熔点和几何形状, 而且各向同性。由于玻璃体的内部质点在急冷时未达到能量最低位置, 大量的化学能储存在材料结构中, 因此其化学稳定性差, 容易与其他物质发生化学反应或产生重新结晶, 这一性质也称为材料的潜在化学活性。如火山灰、粒化高炉矿渣等均属玻璃体, 常被大量用作水泥的掺合料, 用以改善水泥的性质。玻璃体在烧土制品或某些天然岩石中, 起着胶粘剂的

作用。

(3) 胶体 (Colloid) 胶体是物质以极微小的质点 (粒径为 $10^{-7} \sim 10^{-9} \text{m}$) 分散在介质中所形成的结构。由于胶体的质点很微小, 其总表面积很大, 因而具有很大的表面能, 吸附能力很强。所以胶体具有较强的粘结力。胶体可以经脱水或质点的凝聚作用而形成凝胶, 凝胶具有固体的性质, 但在长期应力作用下, 又具有粘性液体的流动性质。硅酸盐水泥的主要水化产物是凝胶体, 混凝土的徐变就是由于水泥凝胶体的粘性流动而产生的。

4. 构造

材料的构造是指具有特定性质的材料结构单元间的相互组合搭配情况。构造概念与结构概念相比, 更强调了相同材料或不同材料的搭配组合关系。如木材的宏观构造和微观构造, 就是指具有相同材料结构单元 (木纤维管状细胞) 按不同的形态和方式在宏观和微观层次上的组合和搭配情况。它决定了木材的各向异性等一系列物理力学性能。又如具有特定构造的节能墙板, 就是由具有不同性质的材料经特定组合搭配而成的一种复合材料, 这种构造赋予墙板良好的保温隔热、吸声隔声、防火抗震、坚固耐久等整体功能和综合性质。

综上所述, 材料的组成、结构、构造的不同使材料具有不同的性质。因此, 研究材料的组成、结构、构造与材料性质之间的关系, 对于掌握材料性质、合理利用材料, 以及进一步改善和提高材料的性能并研制出性能优良的复合材料, 都是非常重要的。

1.2 材料的物理性质

1.2.1 材料的四种密度

1. 密度 (Density)

材料在绝对密实状态下单位体积的质量, 称为密度, 以 ρ 表示, 其计算公式为

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

式中 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, 是指不包括材料内部孔隙在内的固体物质的体积。常用的土木工程材料中, 除钢、玻璃、沥青等少数材料可认为不含孔隙外, 绝大多数材料均或多或少地含有一定的孔隙。测定含孔材料绝对密实体积的简单方法, 是将该材料磨成细粉, 干燥后用密度瓶采用排液法测定其绝对密实体积。由于材料粉磨得越细, 内部孔隙消除得越完全, 测得的体积也就越精确, 因此, 一般要求细粉的粒径不大于 0.20mm。

另外, 工程上还经常用到相对密度, 用材料的密度与 4℃ 纯水密度的比值表示, 无量纲。

2. 表观密度 (Apparent density)

材料单位表观体积 (含材料实体及闭口孔隙体积) 的质量, 也称视密度, 以 ρ' 表示, 其计算公式为

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

式中 m ——材料的质量 (kg 或 g);

V' ——材料在包含闭口孔隙条件下的体积，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可以采用排液置换法或水中称重法测量。

材料的表观密度一般是指材料在干燥状态下单位体积（含闭口孔隙）的质量，称为干表观密度。当材料含水时所测得的表观密度，称为湿表观密度。

3. 体积密度 (Bulk density)

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，称为体积密度，以 ρ_0 表示，其计算公式为

$$\rho_0 = \frac{m}{V_0} \quad (1-3)$$

式中 m ——材料的质量 (kg 或 g)；

V_0 ——材料在自然状态下的体积 (m^3 或 cm^3)。

材料自然状态下的体积，是指包含材料内部孔隙（开口孔隙和闭口孔隙）的体积，如图 1-1 所示。测定材料自然状态体积的方法有量积法、排液法和蜡封法。若材料外观形状规则，可直接度量外形尺寸，按几何公式计算；若外观形状不规则，可用排液法求得；对会发生遇水崩解、溶解和干缩湿胀等情况的材料，为了防止液体由孔隙渗入材料内部而影响测值，应在材料表面涂蜡。另外，材料的体积密度与含水状况有关。材料含水时，质量要增加，体积也会发生不同程度的变化。因此，一般测定体积密度时，以干燥状态为准，而对含水状态下测定的体积密度，须注明含水情况。

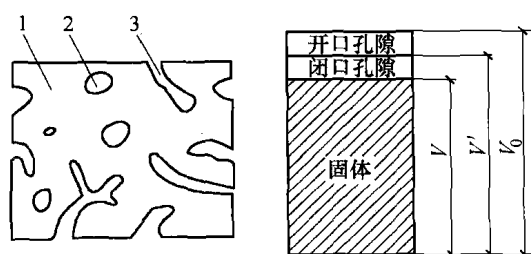


图 1-1 含孔材料体积组成示意图

1—固体 2—闭口孔隙 3—开口孔隙

4. 堆积密度 (Packing density)

散粒材料在自然堆积状态下单位体积的质量，称为堆积密度，以 ρ'_0 表示，可按下式计算

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

式中 m ——散粒材料的质量 (kg)；

V'_0 ——散粒材料的自然堆积体积 (m^3)。

散粒材料堆积状态下的外观体积，既包含了颗粒自然状态下的体积，又包含了颗粒之间的空隙体积（见图 1-2），即包括固体体积、孔隙体积和空隙体积三部分。散粒材料的堆积体积，常用其所填充的容器的标定容积表示。散粒材料的堆积方式若是自然松散的，称为自然堆积；若是捣实的，称为紧密堆积。在自然堆积状态下所测得的是自然堆积密度或松散堆积密度，在紧密堆积状态下所测得的是紧密堆

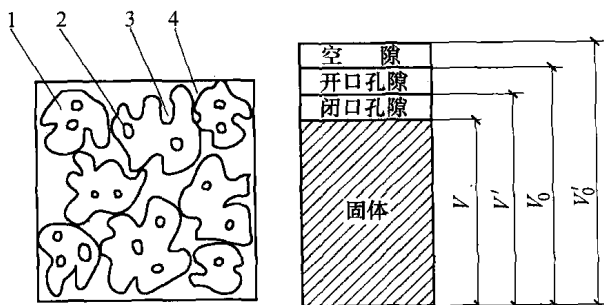


图 1-2 散粒材料体积构成示意图

1—颗粒中固体物质 2—颗粒的闭口孔隙
3—颗粒的开口孔隙 4—颗粒间的空隙