

普通高等教育“十二五”土木工程系列规划教材

土木工程 材料

● 杜红秀 周梅 主编

EDUCATION



免费电子课件



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”土木工程系列规划教材

土 木 工 程 材 料

主 编	杜红秀	周 梅
副主编	郑淑平	崔正龙
参 编	成全喜	阎蕊珍
主 审	张 雄	

机 械 工 业 出 版 社

本教材是吸取了国内外土木工程材料的新成就、新技术,结合我国相关新标准、新规范编写而成的。本教材内容具有新颖性、前瞻性和实用性,在满足学生学习土木工程材料知识和教学要求的同时,有利于学生开阔新思路。

本书内容涉及土木工程常用材料的基本组成、性能、质量要求及材料检验等基本理论和试验方法,主要包括土木工程材料的基本性质、无机气硬性胶凝材料、水泥、混凝土、建筑砂浆、金属材料、木材、天然石材、墙体材料与屋面材料、有机高分子材料、沥青及沥青混合料、防水材料、绝热材料与吸声隔声材料、装饰材料和土木工程材料试验等。

本书可作为土木工程及相近专业本科教材,也可供与土木工程专业相关的设计、科研、施工、生产及管理人员参考。

本书配有电子课件,免费提供给选用本书的授课教师。需要者请根据书末的“信息反馈表”索取。

图书在版编目(CIP)数据

土木工程材料/杜红秀,周梅主编. —北京:机械工业出版社,2012.8
普通高等教育“十二五”土木工程系列规划教材
ISBN 978-7-111-38164-8

I. ①土… II. ①杜…②周… 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(2012)第136898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:刘涛 责任编辑:刘涛 林辉

版式设计:霍永明 责任校对:陈立辉

封面设计:张静 责任印制:乔宇

北京瑞德印刷有限公司印刷(三河市胜利装订厂装订)

2012年8月第1版第1次印刷

184mm×260mm·26.5印张·657千字

标准书号:ISBN 978-7-111-38164-8

定价:49.80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

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

普通高等教育“十二五”土木工程系列规划教材

编 审 委 员 会

主任委员:

姜忻良 天津大学 教授、博导

副主任委员:

张向东 辽宁工程技术大学 教授、博导

李自林 天津城市建设学院 教授、博导

委 员:

李 殊 太原理工大学 教授、博导

魏连雨 河北工业大学 教授、博导

王成华 天津大学 教授

李 斌 内蒙古科技大学 教授

赵根田 内蒙古科技大学 教授

胡启平 河北工程技术大学 教授

张瑞云 石家庄铁道大学 教授

段树金 石家庄铁道大学 教授

段敬民 天津城市建设学院 教授

张敏江 沈阳建筑大学 教授

徐世法 北京建筑工程学院 教授

曹启坤 辽宁工程技术大学 教授

张泽平 太原理工大学 教授

前 言

本书是以建设部高等学校土木工程专业指导委员会制定的土木工程专业培养目标和培养方案及土木工程专业课程设置为指导,以该委员会审定的土木工程材料课程教学大纲为依据编写的。本书吸取了国内外土木工程材料新成就、新技术,结合我国相关新标准、新规范,理论联系实际,介绍了土木工程材料的新技术和发展方向,在满足教学要求的同时,有利于学生开阔新思路、正确合理地选用土木工程材料。本书可作为土木工程类专业的教学用书,也可供土木工程设计、施工、科研、工程管理等技术人员学习参考。

本书由太原理工大学杜红秀教授、辽宁工程技术大学周梅教授级高工主编,天津城市建设学院郑淑平副教授和辽宁工程技术大学崔正龙副教授担任副主编,天津城市建设学院成全喜高级实验师和太原理工大学阎蕊珍讲师参加编写,同济大学张雄教授主审。各章节编写人员如下:杜红秀编写绪论、第1章、第4章(4.5节、4.8节)、第5章(5.4~5.6节)、第6章(6.4~6.9节)、第8章、第9章及负责全书统稿,周梅编写第2章、第3章、第4章(4.4节、4.6节、4.7节)、15.2节和15.9节,郑淑平编写第4章(4.1~4.3节)、第5章(5.1~5.3节)、第6章(6.1~6.3节)、第13章和15.10节,崔正龙编写第10章、第11章(11.1~11.2节)和第12章,成全喜编写第7章、15.3节~15.5节,阎蕊珍编写第11章(11.3~11.5节)、第14章、15.1节、15.6~15.8节。

由于编者的水平所限,书中不当之处,敬请读者批评指正。

编 者

目 录

前言		4.7 其他品种混凝土	138
绪论	1	4.8 水泥混凝土技术进展	149
0.1 土木工程材料与土木工程建设 的关系	1	复习思考题	160
0.2 土木工程材料的概念及分类	1	第5章 建筑砂浆	162
0.3 土木工程材料的发展概况	2	5.1 建筑砂浆的基本组成和性质	162
0.4 土木工程材料的发展趋势	3	5.2 砌筑砂浆	166
0.5 土木工程材料的标准化	4	5.3 抹面砂浆	169
0.6 本课程学习的目的、任务和 要求	4	5.4 预拌砂浆	172
第1章 土木工程材料的基本性质	5	5.5 建筑保温节能体系用砂浆	182
1.1 材料的组成、结构与构造	5	5.6 特种砂浆与新型装饰砂浆	189
1.2 材料的基本物理性质	10	复习思考题	191
1.3 材料的基本力学性质	20	第6章 金属材料	192
1.4 材料的耐久性	24	6.1 钢材的冶炼和分类	193
1.5 材料的环境协调性	25	6.2 建筑钢材的主要技术性能	194
复习思考题	28	6.3 钢的组织 and 化学成分对钢材性能 的影响	200
第2章 无机气硬性胶凝材料	29	6.4 钢材的冷加工、时效强化与热 处理	203
2.1 建筑石膏	29	6.5 土木工程常用钢材的品种与 选用	207
2.2 建筑石灰	35	6.6 土木工程常用钢材	215
2.3 水玻璃	40	6.7 钢材的腐蚀与防护	230
复习思考题	42	6.8 铝及铝合金	233
第3章 水泥	43	6.9 铜及铜合金	236
3.1 硅酸盐水泥与普通硅酸盐水泥	43	复习思考题	237
3.2 掺大量混合材料的硅酸盐水泥	55	第7章 木材	238
3.3 特性水泥	61	7.1 木材的分类和构造	238
复习思考题	67	7.2 木材的主要性质	240
第4章 混凝土	69	7.3 木材的防护	245
4.1 混凝土概述	69	7.4 木材的应用	247
4.2 普通混凝土的组成材料	72	复习思考题	249
4.3 普通混凝土的技术性质	94	第8章 天然石材	250
4.4 混凝土的质量控制与强度评定	116	8.1 岩石的组成与分类	250
4.5 混凝土的配合比设计	121	8.2 岩石的构造与性能	252
4.6 轻混凝土	133		

8.3 石材的技术性质	253	12.3 建筑密封材料	338
8.4 土木工程中常用石材	256	复习思考题	339
8.5 石材的应用及防护	259	第13章 绝热材料与吸声隔声材料	340
8.6 石材的选用	260	13.1 绝热材料	340
复习思考题	261	13.2 吸声、隔声材料	346
第9章 墙体材料与屋面材料	262	复习思考题	350
9.1 墙体材料	262	第14章 装饰材料	351
9.2 屋面材料	286	14.1 装饰材料的基本要求与功能	351
复习思考题	288	14.2 装饰石材	353
第10章 有机高分子材料	289	14.3 建筑陶瓷	356
10.1 有机高分子材料的基本 知识	289	14.4 建筑玻璃	358
10.2 建筑塑料	291	14.5 有机高分子装饰制品	359
10.3 胶粘剂	296	14.6 金属装饰材料	361
10.4 涂料	299	复习思考题	362
复习思考题	302	第15章 土木工程材料试验	363
第11章 沥青及沥青混合料	303	15.1 土木工程材料的基本性质 试验	363
11.1 沥青材料	303	15.2 水泥试验	366
11.2 改性石油沥青	311	15.3 混凝土用砂、石试验	372
11.3 沥青混合料	314	15.4 普通混凝土试验	380
11.4 矿质混合料的组成设计	319	15.5 建筑砂浆试验	386
11.5 热拌沥青混合料的配合比 设计	325	15.6 钢筋试验	390
复习思考题	330	15.7 木材试验	395
第12章 防水材料	331	15.8 砌墙砖试验	399
12.1 防水卷材	331	15.9 沥青试验	402
12.2 防水涂料	336	15.10 沥青混合料试验	405
		参考文献	416

绪 论

0.1 土木工程材料与土木工程建设的关系

在我国现代化建设中，土木工程材料占有极为重要的地位。各项建设的开始，无一例外地首先都是土木工程基本建设，而土木工程材料则是一切土木工程的物质基础。土木工程材料在土木工程中应用量大，经济性强，直接影响工程的造价。在我国，通常材料费用在工程总造价中占40%~70%，因此，材料质量的优劣和配制是否合理以及选用是否适当等，对土木工程的安全、实用、美观、耐久和造价具有重要意义。

土木工程材料的品种、质量和性能直接影响土木工程的坚固、耐久和适用，并在很大程度上影响着结构形式和施工方法。土木工程材料的发展水平直接影响着土木工程行业的发展。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；而新材料的出现，又将促使结构设计和施工技术的革新。例如，黏土砖的出现，产生了砖木结构；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；轻质材料和绝热材料的出现，对减轻结构自重、提高结构抗震能力、改善工作与生活环境条件及建筑节能等起到了重要作用；新型装饰材料的出现，使得建筑物的美观、功能及舒适性等进一步提高。随着土木工程技术的发展，又将不断地对土木工程材料提出新的更高的要求。因此，土木工程材料的生产及科学技术的迅速发展，对发展我国土木工程行业无疑具有重要的作用。

0.2 土木工程材料的概念及分类

土木工程材料是指土木工程所用的各种材料的总称，除水泥、钢筋、木材、混凝土、砌墙砖、石灰、沥青、瓷砖等常见的土木工程材料外，还包括卫生洁具、暖气及冷风设备等器材，以及施工过程中的暂设工程，如围墙、脚手架、板桩、模板等所用的材料。狭义的土木工程材料是指构成土木工程建筑物或构筑物本身的土木工程材料，如结构材料、装饰材料等。

土木工程材料的来源非常广泛，有矿物岩石、植物、动物（皮革）、金属材料等。

土木工程材料的加工方式主要有物理加工、煅烧、物理化学变化等。

土木工程材料可按不同的原则进行分类。根据材料来源，可分为天然材料和人工材料；根据材料在土木工程中的功能可分为结构材料、装饰材料、绝热材料、防水材料等；根据材料在土木工程中的使用部位可分为承重构件用材料、墙体材料、屋面材料、地面材料等。最常见的分类方法是根据材料的化学成分来分类，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，如表0-1所示。

表 0-1 土木工程材料按化学成分的分类

土 木 工 程 材 料	无 机 材 料	金 属 材 料	黑色金属——钢、铁、不锈钢等
			有色金属——铝、铜及其合金等
		非 金 属 材 料	天然石材——砂、石及石材制品等
			烧土制品——砖、瓦、玻璃、陶瓷等
			胶凝材料——石灰、石膏、水玻璃、水泥等
	有 机 材 料	混凝土及硅酸盐制品——混凝土、砂浆、灰砂砖、加气混凝土、混凝土砌块等	
		植物材料——木材、竹材等	
		沥青材料——石油沥青、煤沥青、沥青制品	
	复 合 材 料	高分子材料——塑料、涂料、胶粘剂、合成橡胶等	
		无机非金属材料与有机材料复合——玻璃纤维增强塑料、聚合物混凝土、沥青混凝土、水泥刨花板等	
		金属材料与无机非金属材料复合——钢筋混凝土、钢纤维增强混凝土等	
		金属材料与有机材料复合——轻质金属夹芯板（聚苯乙烯泡沫塑料芯材）	

0.3 土木工程材料的发展概况

土木工程材料在社会发展的所有阶段中，都是随着社会生产力和科学技术水平的发展而发展的，它反映出每个时代的科学和文化特征，成为人类物质文明的重要标志之一。

早在原始社会时期，人类为了抵御雨雪风寒和防止野兽的侵袭，栖身于天然洞穴或树巢中，即所谓“穴居巢处”。进入石器、铁器时代，人们开始利用简单的工具，挖土凿石成洞、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。今天，世界各地还保存了许多蔚为壮观的古代建筑或建筑遗迹，从中可以看出古代劳动人民使用土木工程材料的技术成就。在我国，举世闻名的万里长城历经千百年而不毁；山西五台山佛光寺大殿，1100多年来历经风霜雨雪和地震，依然完整健在；山西应县的九层六檐木塔，高达67.3m，将近1000年仍巍然屹立在祖国大地。在国外，埃及的金字塔、希腊的雅典卫城、欧洲各地中世纪的教堂，至今仍令人们惊叹不已。

但无论中外，在漫长的奴隶社会和封建社会中，土木工程技术和土木工程材料的发展都是相当缓慢的。直到18、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、水泥及其他材料相继问世，为现代土木工程奠定了基础。我国虽然古代建筑有“秦砖汉瓦”、描金漆绘装饰艺术、造型优美的石塔和石拱桥的辉煌，但在封建社会时期，生产力发展停滞不前，使用的结构材料依然是砖、石和木材，现代化材料发展迟缓；新中国建立以后，土木工程材料工业才真正开始并蓬勃发展起来。新材料对土木工程的设计、施工及建筑面积产生了决定性的影响，有了钢材和水泥这两种工业生产的新型土木工程材料，各种土木工程跨越了几千年来土、木、砖、石的限制，开始大踏步地向前发

展。修建黄河、长江大桥,营造摩天大楼及大跨度的厂房、剧院等。现在,每一项重要的土木工程都离不开这两种材料。钢材和水泥的使用标志着土木工程发展史上的一个新阶段。

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,如铝材、塑料以及各种轻质高强的复合材料。为适应土木工程工业化、现代化的要求,各种新型的具有特殊功能的土木工程材料大量涌现,以高分子材料为主的化学建材异军突起,新型的绝热材料、吸声隔声材料、各种装饰材料、耐热防火材料、防水抗渗材料以及耐磨、耐蚀、防爆和防辐射材料等应运而生。

随着科学技术的发展和现代测试技术的进步,必将不断地将材料科学这门新学科推向前进,不久的将来,按指定性能设计和制造新材料的时期将会到来。

0.4 土木工程材料的发展趋势

随着社会的进步、环境保护和节能降耗的需要,对土木工程材料提出了更高、更多的要求。当今,土木工程材料发展的总原则为:具有健康、安全、环保的基本特征;满足轻质、高强、耐久、多功能及智能化的优良技术性能和美观的美学功能;符合节能、节地、利废三条件。因而,今后一段时间内,土木工程材料将向以下几个方面发展。

(1) 改进传统材料,使之轻质高强 现今钢筋混凝土结构材料自重大(每立方米重约 2500kg),限制了结构物向高层、大跨度方向进一步发展。通过减轻材料自重,以尽量减轻结构物自重,并可提高经济效益。目前,主要的发展趋势是提高混凝土强度及性能、大力发展加气混凝土、轻集料(又称骨料)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) 研制新型材料,发展轻型材料和有机材料 大力发展新型金属材料如铝合金结构材料、有机高分子材料或复合材料(如玻璃纤维增强塑料)。

(3) 扩大材料来源,利用废渣 充分利用工农业废渣、工业副产品、建筑垃圾等生产土木工程材料,将各种废渣尽可能资源化,以保护环境、节约自然资源,使人类社会可持续发展。

(4) 改进生产工艺,节约资源能源 大力引进现代技术,改造或淘汰陈旧设备,采用低能耗制造工艺和对环境无污染的生产技术,降低原材料及能源消耗,减少环境污染。

(5) 多功能化及智能化 利用复合技术生产多功能材料、特殊性能材料及智能化材料,这对提高建筑物的使用功能、经济性、加快施工速度及向智能化社会发展等有着十分重要的作用。

(6) 绿色化 产品的设计是以改善生产环境,提高生活质量为宗旨。产品具有多功能,有益于人的健康;产品可循环或回收再利用,或形成无污染环境的废弃物;产品配制和生产过程中,不使用对人体和环境有害的污染物质。

(7) 产品规格化、预制化 积极发展预制技术,逐步提高构件化、标准化水平,以利于工业化生产,加快施工进度。

(8) 加强测试技术的发展 通过现代测试技术,认识材料内部组织、结构及构造等对材料性能的影响,按指定性能设计和制造新材料。

0.5 土木工程材料的标准化

土木工程材料的技术标准是产品质量的技术依据。这些技术标准涉及产品规格、分类、技术要求、验收规则、代号与标志、运输与储存及抽样方法等。对于生产企业，必须按照标准生产，控制其质量，同时它可促进企业改善管理，提高生产技术和生产效率。对于使用部门，则按照标准选用、设计、施工，并按标准验收产品。

在我国，技术标准分为国家标准、行业标准、地方标准和企业标准四级，各级标准分别由相应的标准化管理部门批准并颁布。技术标准代号按标准名称、部门代号、编号和批准年份的顺序编写，按要求执行的程度分为强制性标准和推荐标准（在部门代号后加“/T”表示“推荐”）。相关技术标准的部门代号有 GB——国家标准，JG——建筑工业行业标准，JC——国家建材局标准，YB——冶金部标准，HG——化工部标准，DB——地方标准，QB——企业标准等。例如，国家标准 GB 175—2007《通用硅酸盐水泥》，部门代号为 GB，编号为 175，批准年份为 2007 年，为强制性标准；国家标准 GB/T 700—2006《碳素结构钢》，部门代号为 GB，编号为 700，批准年份为 2006 年，为推荐性标准。

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。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黑体字标志的条文为强制性条文。

工程中有时还涉及美国材料试验学会标准 ASTM、英国标准 BS、日本标准 JIS、德国标准 DIN、法国标准 NF、前苏联标准 ГOCT、国际标准 ISO 等。

0.6 本课程学习的目的、任务和要求

本课程是土建类各专业的技术基础课，其任务是使学生获得有关土木工程材料的技术性质及应用的基本知识和必要的基本理论；并获得主要土木工程材料试验方法的基本技能训练。要求通过本课程的学习，使学生掌握主要土木工程材料的性质、用途、制备和使用方法以及检测和质量控制方法，了解工程材料性质与材料组成、结构及构造的关系，以及性能改善的途径；除了课堂教学，试验课是本课程必不可少的重要教学环节，通过试验，验证基本理论、学会常用土木工程材料的试验方法和技术、培养严谨认真的科学态度和综合分析解决问题的能力；针对不同工程应能合理选用材料，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，达到设计时正确选用材料，施工时合理使用材料的目的。

第 1 章 土木工程材料的基本性质

土木工程材料是土木工程的物质基础，材料的性质与质量很大程度上决定了工程的性能与质量。在工程实践中，选择、使用、分析和评价材料，通常是以其性质为基本依据的。例如，用于受力结构中的材料，要承受各种力的作用，因此要求材料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，屋面材料具有防水性质，路面材料具有防滑、耐磨损等性质；由于土木工程在长期的使用过程中，经常受到风吹、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。另外，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，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。

土木工程材料的性质，可分为基本性质和特殊性质两大部分。材料的基本性质是指土木工程中通常必须考虑的最基本的、共有的性质；材料的特殊性质则是指材料本身的不同于别的材料的性质，是材料的具体使用特点的体现。

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。材料的组成是决定材料性质的最基本因素。

1. 化学组成

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。无机非金属材料常用组成其的各氧化物的含量来表示；金属材料常用组成其的各化学元素的含量来表示；有机材料则常用组成其的各化合物含量来表示。化学组成是决定材料化学性质、物理性质和力学性质的主要因素。

2. 矿物组成

矿物是具有一定化学成分和结构特征的稳定单质或化合物。矿物组成是指构成材料的矿物的种类和数量。无机非金属材料是由各种矿物组成的。材料的化学组成不同，其矿物组成不同；相同的化学组成，可组成多种不同的矿物。矿物组成不同的材料，其性质也不同。如硅酸盐水泥中， CaO 和 SiO_2 是其主要化学成分，它们组成的主要矿物是硅酸三钙（ C_3S ）和硅酸二钙（ C_2S ），这两者的性质相差很大，其组成比例是决定水泥性质的主要因素。

3. 相组成

材料中具有相同结构、相同成分和性能，并以界面相互分开的均匀组成部分称为相。相组成是指构成材料的相的种类、数量、大小、形态和分布。自然界中的物质可分为气相、液相和固相。材料中同种化学物质由于加工工艺不同，温度、压力等环境条件不同，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。同种物质在不同的温度、压力等环境条件下，也常会转变其存在状态，如由气相转变为液相或固相。当组成相的数量、大小、形态和分布不同时，材料的性能也就不同。例如，可以通过改变合金的相组成来改变合金的性能。土木工程材料大多是多相固体材料，这种由两相或两相以上的物质组成的材料，称为复合材料。例如，混凝土可认为是由集料颗粒（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，界面是一个较薄区域，它的成分和结构与相内的部分是不一样的，可以作为“界面相”来处理。因此，对于土木工程材料，可以通过改变和控制其相组成和界面特性，来改善和提高材料的技术性能。

1.1.2 材料的结构

材料的结构是决定材料性能的另一个极其重要的因素。材料的结构可分为微观结构、细观结构和宏观结构。

1. 微观结构

微观结构是指材料物质的原子或分子层次的结构，需要用电子显微镜、X射线衍射等技术手段来分析研究其结构特征，包括材料物质的种类、形态、大小及其分布特征。微观结构的尺寸范围在 $10^{-6} \sim 10^{-10} \text{m}$ 。材料的许多物理性质，如强度、硬度、弹塑性、导热性等都与其结构有密切关系。土木工程材料的使用状态一般为固体，固体的微观结构可分为晶体和非晶体两大类，而非晶体材料又可分为玻璃体和胶体两类。

(1) 晶体 晶体是指材料内部的质点（原子、离子、分子）在空间上按一定规律呈周期性排列时所形成的结构，如图 1-1a 所示。晶体具有如下特点：①具有特定的几何外形，这是晶体内部质点按特定规则排列的外部表现；②由于质点在各方向上的排列的规律和数量不同，单晶体具有各向异性的性质，但实际应用的材料，是由大量细小的晶粒不规则排列组成的，因此所组成的材料整体又具有各向同性的性质；③具有固定的熔点和化学稳定性，这是晶体键能和质点所处最低的能量状态所决定的；④结晶接触点和晶面是晶体破坏或变形的薄弱部分。例如石英、金属等均属于晶体结构。

根据组成晶体的质点及化学键的不同，晶体可分为原子晶体（如石英）、离子晶体（如 CaCl_2 ）、分子晶体（如有机化合物）、金属晶体（如钢铁材料）。材料的微观结构形式与主要特征如表 1-1 所示。

由于微观结构上的差异，使各种材料的强度、硬度、变形、熔点、导热性等各不相同。

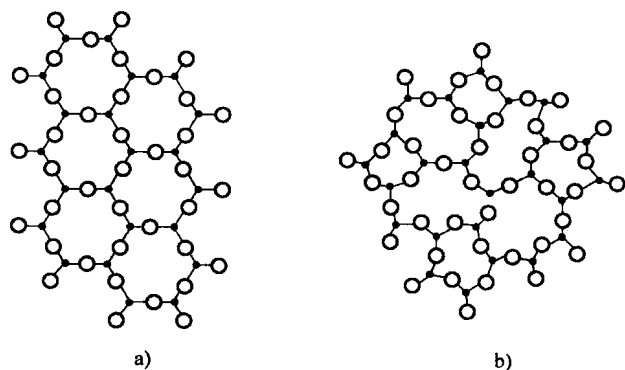


图 1-1 晶体与非晶体的结构示意图

a) 晶体 b) 玻璃体

●—硅原子 ○—氧原子

表 1-1 材料的微观结构形式与主要特征

微观晶体			常见材料	主要特征
晶体	原子、离子、分子按一定规律排列	原子晶体（共价键）	金刚石、石英	强度、硬度、熔点高，密度较小
		离子晶体（离子键）	氯化钠、石膏、石灰岩	强度、硬度、熔点较高，但波动大，部分可溶，密度中等
		分子晶体（分子键）	蜡、斜方硫、萘	强度、硬度、熔点较低，大部分可溶，密度小
		金属晶体（库仑引力）	铁、钢、铜、铝及合金	强度、硬度变化大，密度大
玻璃体	原子、离子、分子以共价键离子键或分子键结合，但为无序排列		玻璃、矿渣、火山灰、粉煤灰	无固定的熔点和几何形状，各向同性，与同组成的晶体相比，强度、化学稳定性、导热性、导电性较差
胶体	离子、分子的集合体，以共价键离子键或分子键结合，但为无序排列		水泥凝胶体、石膏浆体、石灰浆体	胶体微粒在 $1 \sim 100\text{nm}$ 。胶体粒子较小，表面积很大，吸附能力很强

无机非金属材料的晶体，其键的构成不是单一的，往往是由共价键、离子键等共同连接，其性质差异较大。在土木工程材料中占有重要地位的硅酸盐，是由其最基本的结构单元硅氧四面体 SiO_4 （见图 1-2）与其他金属离子结合而成。硅氧四面体相互连接时，可形成不同结构类型的矿物：硅氧四面体在一维方向上以链状结构相连时，形成纤维状矿物，如石棉，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、滑石等则是由硅氧四面体在二维方向上相互连接成片状结构，再由片状结构叠合成层状结构的矿物，其层与层之间的范德华力键合力较弱，故这类材料容易剥成薄片；石英是硅氧四面体在三维空间上以共价键相连形成的立体网状结构矿物，故其结构强度较大，具有坚硬的质地。

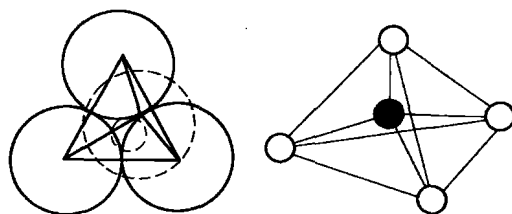


图 1-2 硅氧四面体的结构示意图

●—硅原子 ○—氧原子

棉，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、滑石等则是由硅氧四面体在二维方向上相互连接成片状结构，再由片状结构叠合成层状结构的矿物，其层与层之间的范德华力键合力较弱，故这类材料容易剥成薄片；石英是硅氧四面体在三维空间上以共价键相连形成的立体网状结构矿物，故其结构强度较大，具有坚硬的质地。

(2) 玻璃体 玻璃体也称为无定形体或非晶体。玻璃体是熔融物在急速冷却时，质点来不及按特定规律排列所形成的质点无序排列的固体或固态液体，如图 1-1b 所示。玻璃体没有固定的熔点和几何外形，各向同性，其强度、导热性和导电性等低于晶体。玻璃体的质点无排列规律，即质点未达到能量最低的稳定位置，保留了高温下的高能量状态，内部还有大量的化学能未能释放出来，而以内能的形式储存起来。故玻璃体具有化学活性，稳定性较差，易与其他物质反应或自行缓慢向晶体转变。如粒化高炉矿渣、火山灰、粉煤灰等混合材料，都是经过高温急冷得到，含大量玻璃体，工程上利用它们活性高的特点，用于水泥和混凝土的生产，以改善水泥和混凝土的性质。

(3) 胶体 胶体是指粒径为 $10^{-7} \sim 10^{-9}\text{m}$ 的固体颗粒作为分散相，称为胶粒，分散在连续介质中所形成的分散体系。由于胶体的质点很微小，表面积很大，所以表面能很大，吸附能力很强，使胶体具有很强的粘结力。硅酸盐水泥水化后的主要产物水化硅酸钙凝胶体就具有很高的胶凝性，硬化后具有很高的强度。

2. 细观结构

细观结构（也称亚微观结构）是指用光学显微镜所能观察到的结构，其尺度介于微观和宏观之间，尺寸范围在 $10^{-3} \sim 10^{-6} \text{m}$ 。亚微观结构主要研究材料内部的晶粒、颗粒等的大小和形态、晶界或界面的形态、孔隙与微裂纹的大小形状及分布，如水泥石的孔隙结构、金属的金相组织、木材的纤维和管胞组织等。

材料的细观结构对材料的性质影响很大。通常，材料内部的晶粒越细小、分布越均匀，其受力越均匀、强度越高、脆性越小、耐久性越好；晶粒或不同材料组成之间的界面粘结越好，则其强度和耐久性越好。从细观结构层次上改善材料的性能，相对比较容易，具有十分重要的意义。

3. 宏观结构

宏观结构是指用肉眼或放大镜能够分辨的粗大组织，其尺寸在 10^{-3}m 级以上。宏观结构主要研究和分析材料的组合与复合方式、组成材料的分布情况、材料中的孔隙构造、材料的构造缺陷等。

材料按其组成可分为单一材料和复合材料两大类。复合材料是两种或两种以上的材料结合构成的新材料。它集中了组成材料的优点，避免了单一材料的缺陷，性能更优越，功能更强大，是材料发展的主要方向之一。

常见土木工程材料的宏观结构，按孔隙特征可分为密实结构、多孔结构、微孔结构；按存在状态或构造特征可分为纤维结构、聚集结构、层状（叠合）结构、散粒结构。材料宏观结构及主要特征如表 1-2 所示。

表 1-2 材料宏观结构及主要特征

宏观结构	常用材料	主要特征
密实结构	钢铁、玻璃、塑料	高强、不透水、耐腐蚀
多孔结构	泡沫塑料、泡沫玻璃、泡沫混凝土	质轻、保温、绝热、吸声
微孔结构	石膏制品、烧结黏土制品	有一定强度、质轻、保温、绝热、吸声
纤维结构	木、竹、石棉、玻璃纤维	抗拉强度高、质轻、保温、吸声
聚集结构	水泥混凝土、砂浆、沥青混合料	综合性能好、强度高、价格低
层状结构	纸面石膏板、胶合板、夹芯板	综合性能好
散粒结构	砂、石子、陶粒、膨胀珍珠岩	混凝土集料、轻集料、保温绝热材料

具有相同组成和微观结构的材料，可以制成宏观构造不同的材料，其性质和用途随宏观构造的不同差别很大，如玻璃与泡沫玻璃、塑料与泡沫塑料、普通混凝土与加气混凝土；而宏观构造相似的材料，即便其组成和微观结构不同，也具有某些相同或相似的性能和用途，如泡沫玻璃、泡沫塑料、加气混凝土，都具有保温隔热的功能。工程上常用改变材料的密实度、孔隙结构，应用复合材料等方法，来改善材料的性能，以满足不同的需要。

1.1.3 材料的构造

材料的构造是指具有特定性质的材料结构单元的相互搭配情况。构造这一概念与结构相比，进一步强调了相同材料或不同材料间的搭配与组合关系，如材料的孔隙、岩石的层理、木材的纹理等，这些构造的特征、大小、尺寸及形态等，决定了材料特有的一些性质。同一

种类的材料,其构造越均匀、密实,强度越高;构造呈层状、纤维状的,具有各向异性的性质;构造为疏松、多孔的,除降低材料的强度、表观密度外,还会影响其导热性、渗透性、抗冻性、耐久性等。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,经一定组合搭配而成的一种复合材料,它的构造赋予了墙板良好的隔热保温、隔声、防火、抗震、坚固耐久等功能和性质。

材料的组成相同,结构、构造不同,可具有不同的用途,如平板玻璃可用于采光,玻璃纤维可用于增强混凝土,泡沫玻璃则可用于隔热保温;材料的组成不同,结构、构造相同,则可具有相同的用途,如泡沫塑料和泡沫玻璃,均可用作隔热保温材料。因此,材料的构造状态通常决定它的使用性能和使用方法,若选择和使用不当,会造成很大的损失和浪费。

随着材料科学理论和技术的日益发展,深入探索材料的组成、结构、构造与材料性能之间的关系与规律,不仅有利于工程材料的不断发展和正确选用,而且将会加快人类实现按指定性能设计与制造新材料的进程。

1.1.4 材料内部孔隙与性质

1. 内部孔隙的来源与产生

无论是天然材料,还是人造材料,在宏观和亚微观层次上都含有一定数量和一定大小的孔隙,所以说孔隙是材料的组成部分之一,仅少数致密材料(如玻璃、金属)可近似看成是绝对密实的。

天然材料的内部孔隙是在其形成过程中产生的。如天然植物的生长需要养分的输送,其内部形成了一定数量的孔管结构,形成孔隙;天然石材由于在造岩运动中内部夹入部分空气,形成孔隙。人造材料的内部孔隙是在生产过程中受生产条件所限,混入气体,而又去除不完全形成;或是为改变其性质,在材料设计和制造中,有意形成的孔隙。如钢在冶炼过程中,需将生铁熔融进行氧化,其中的碳被氧化成一氧化碳气体而逸出,使碳含量达到一定范围,但脱氧不完全时,就会形成内部气泡;混凝土是由水泥胶结散粒材料形成的,材料在混合中有一定量的气体引入,为保证施工,成型用水量也大大超过水泥水化的需要,多余水分蒸发后,又形成一定量的孔隙;保温绝热材料,则需要其内部有大量密闭空气,以降低导热系数。

2. 孔隙的分类

按内部孔隙的大小,可将孔隙分为微细孔、毛细孔、较粗大孔和粗大孔等。无机非金属材料中,孔径小于20nm的微细孔,水或有害气体难以侵入,可视为无害孔隙。

按孔隙的形状可分为球状孔隙、片状孔隙(裂纹)、管状孔隙、墨水瓶状孔隙、尖角孔隙等。按常压下水能否进入,可分为开口孔隙(连通孔隙)和闭口孔隙(见图1-3)。闭口孔隙常压下水不能进入,但当水压力高于孔壁阻力时,水也会进入其中。球状孔隙是闭口孔隙,其他形状的孔隙为开口孔隙。开口孔隙对

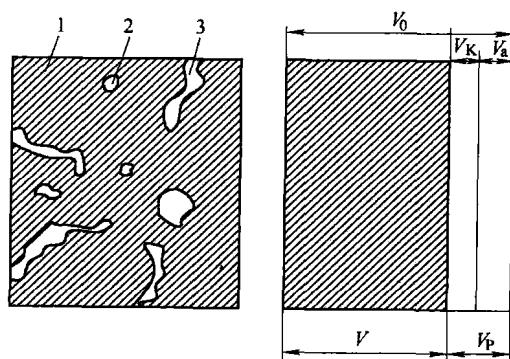


图1-3 含孔材料体积组成示意图

1—固体物质 2—闭口孔 3—开口孔

材料性质的影响较大,可使材料的大多数性质降低。

3. 孔隙对材料性质的影响

同一种材料其孔隙率越高,密实度越低,则材料的表观密度、体积密度、堆积密度越小,强度、弹性模量越低;耐磨性、耐水性、抗渗性、抗冻性、耐腐蚀性及其他耐久性越差,而吸水性、吸湿性、保温性、吸声性越强。

孔隙是开口还是闭口,对性质的影响也有差异。水和侵蚀介质容易进入开口孔隙,开口孔隙多的材料,其强度、耐磨性、耐水性、抗渗性、抗冻性、耐蚀性等性质下降更多,而其吸声性、吸湿性和吸水性更好,孔隙的尺寸越大,其影响也越大。适当增加材料中密闭孔隙的比例,可阻断连通孔隙,部分抵消冰冻的体积膨胀,在一定范围内提高其抗渗性、抗冻性。

由此可见,改变材料内部孔隙,是改善材料性能的重要手段。

1.2 材料的基本物理性质

1.2.1 材料的体积组成

大多数土木工程材料的内部都含有孔隙,孔隙的多少和孔隙的特征对材料的性能均产生影响。

孔隙特征主要指孔尺寸、孔与外界是否连通。孔隙与外界相连通的叫开口孔,与外界不相连通的叫闭口孔。

含孔材料的体积组成如图 1-3 所示。含孔材料的体积包括以下三种:

(1) 材料绝对密实体积 用 V 表示,是指不包括材料内部孔隙的固体物质本身的体积。

(2) 材料的孔体积 用 V_p 表示,指材料所含孔隙的体积,分为开口孔体积(记为 V_k)和闭口孔体积(记为 V_B)。

(3) 材料在自然状态下的体积 用 V_0 表示,是指材料的实体积与材料所含全部孔隙体积之和。

上述几种体积存在以下关系

$$V_0 = V + V_p$$

其中

$$V_p = V_k + V_B$$

散粒状材料的体积组成如图 1-4 所示。其中 V'_0 表示材料堆积体积,是指在堆积状态下的材料颗粒体积和颗粒之间的间隙体积之和。 V_j 表示颗粒与颗粒之间的间隙体积。散粒状土木工程材料体积关系如下

$$V'_0 = V_0 + V_j = V + V_p + V_j$$

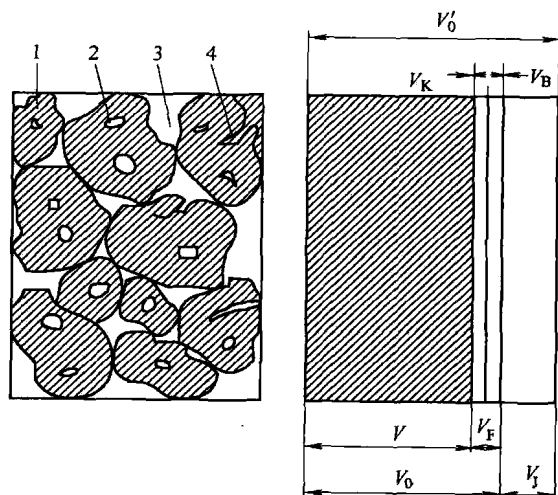


图 1-4 散粒材料堆积体积组成示意图

1—颗粒的固体物质 2—颗粒的闭口孔隙
3—颗粒间的间隙 4—颗粒的开口孔隙