

普通高等教育“十二五”规划教材

土木工程材料

何晓鸣 伦云霞 主编
李 杰 主审

TUMU GONGCHENG
CAILIAO

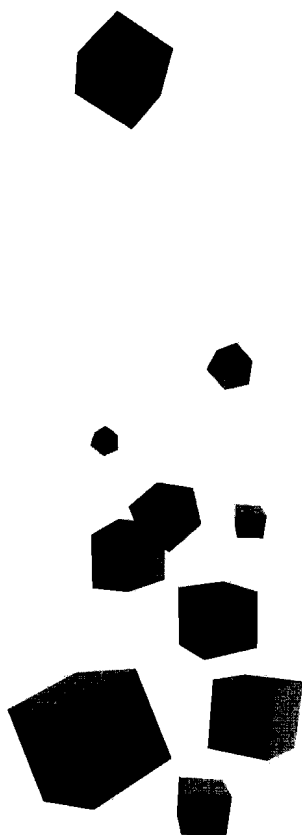


化学工业出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

土木工程材料

何晓鸣	伦云霞	主 编
刘肖凡	刘绍舜	王雨利 副主编
	李 杰	主 审



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书是普通高等教育“十二五”规划教材。

全书共分为 12 章, 主要介绍了土木工程材料的基本性质、气硬性胶凝材料、水泥、水泥混凝土、沥青材料、沥青混合料、建筑钢材、木材、砌筑材料、工程高分子聚合物材料、建筑功能材料等内容。

本书可作为高等学校土木工程、工程管理类、工民建类、建筑学类等专业的教材, 也可供相关领域的管理人员、技术人员学习参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

土木工程材料/何晓鸣, 伦云霞主编. —北京: 化学工业出版社, 2011.8

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-122-11772-4

I. 土… II. ①何…②伦… III. 土木工程-建筑材料-高等学校-教材 IV. TU5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 131557 号

责任编辑: 满悦芝
责任校对: 王素芹

文字编辑: 荣世芳
装帧设计: 尹琳琳

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京云浩印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 17 $\frac{3}{4}$ 字数 476 千字 2011 年 9 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 36.00 元

版权所有 违者必究

前 言

随着国家基础设施建设规模的扩大，对土木工程人才的需求量急剧增大，土木工程专业教育在我国也得到了飞速发展。为了培养具有扎实的基本理论及较强基本技能的土木工程专业应用型人才，我们结合最新的国家标准、部颁标准、行业标准及最新的研究动态，并根据我国土木工程专业指导委员会教学大纲要求编写了本教材。

本书由何晓鸣、伦云霞任主编，刘肖凡、刘绍舜和王雨利任副主编。各章编写分工如下：第1~3章、第10章和附录由伦云霞（武汉工业学院）编写，第4章由徐方（中国地质大学）编写，第5章由王雨利（河南理工大学）编写，第6章由何晓鸣（武汉工业学院）编写，第7章由孟晓雷（沈阳大学）编写，第8章由刘肖凡（武汉工业学院）编写，第9章、第11章由刘绍舜（中国葛洲坝股份有限公司）编写，第12章由刘杰胜（武汉工业学院）编写，研究生梁洁、刘卫娟、雷小文、杨乾隆、伍昕茹、卢静、萨昊亮、李玉龙、王德焱等参与了编写和整理工作。

本书可作为高等学校土木工程、工程管理类、工民建类、建筑学类等有关专业建筑材料课程的教材，也可供相关人员学习参考。本教材不仅力争做到能满足教师 and 学生的教学基本要求，而且又增加了部分拓展内容。

由于编者时间和水平有限，书中不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

编者
2011年8月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 土木工程材料的定义和基本要求	1
1.2 土木工程材料的分类	1
1.3 材料在土木工程中的地位	2
1.4 土木工程材料的发展歷程和方向	2
1.5 工程技术标准	2
1.6 本课程的地位和学习任务	3
第 2 章 土木工程材料的基本性质	4
2.1 材料的组成和结构	4
2.1.1 材料的组成	4
2.1.2 材料的结构	4
2.2 材料的物理性质	5
2.2.1 基本物理性质	5
2.2.2 材料与水有关的性质	8
2.2.3 材料的热工性质	10
2.3 材料的基本力学性质	11
2.3.1 材料的强度	11
2.3.2 材料的弹性与塑性	13
2.3.3 材料的脆性和韧性	13
2.4 材料的耐久性	13
思考题与习题	14
第 3 章 气硬性胶凝材料	15
3.1 石膏	15
3.1.1 石膏的原料和生产	15
3.1.2 建筑石膏的水化与硬化	16
3.1.3 建筑石膏的技术性质	16
3.1.4 建筑石膏的应用	17
3.2 石灰	18
3.2.1 石灰的原料及生产	18
3.2.2 石灰的熟化和硬化	18
3.2.3 石灰的技术要求和技术标准	19
3.2.4 石灰的技术性质及应用	21
3.3 水玻璃	22
3.3.1 水玻璃的生产和硬化	22
3.3.2 水玻璃的性质及应用	22
思考题与习题	23
第 4 章 水泥	24
4.1 硅酸盐水泥	24
4.1.1 硅酸盐水泥的组成材料	24
4.1.2 硅酸盐水泥的生产与矿物成分	25
4.1.3 硅酸盐水泥的水化与凝结硬化	26
4.1.4 硅酸盐水泥的技术性质	29
4.1.5 硅酸盐水泥的特点与应用范围	31
4.1.6 硅酸盐水泥的储运与管理	31
4.2 掺混合材料的硅酸盐水泥	32
4.2.1 水泥混合材料	32
4.2.2 掺混合材料的硅酸盐水泥（通用水泥）	33
4.3 其他品种水泥	35
4.3.1 铝酸盐水泥	35
4.3.2 快硬型水泥	35
4.3.3 膨胀型水泥	36
4.3.4 白色及彩色硅酸盐水泥	37
4.3.5 道路水泥	38
4.3.6 中、低热硅酸盐水泥和低热矿渣硅酸盐水泥	38
4.3.7 砌筑水泥	39
思考题与习题	40
第 5 章 水泥混凝土	41
5.1 概述	41
5.1.1 混凝土的优越性	42

5.1.2 混凝土的局限性	43	分布	115
5.2 混凝土的组成材料	44	5.6.2 强度平均值、标准差、变异系数	115
5.2.1 水泥	44	5.6.3 概率分布函数	116
5.2.2 集料	53	5.6.4 强度保证率	117
5.2.3 混凝土拌和用水	67	5.6.5 混凝土的配制强度	117
5.3 水泥混凝土的主要技术性质	67	5.6.6 混凝土强度的检验评定	117
5.3.1 工作性	67	5.7 混凝土的配合比设计	118
5.3.2 凝结时间	79	5.7.1 设计要领	118
5.3.3 强度	80	5.7.2 设计流程	119
5.3.4 混凝土的断裂与破坏	85	5.7.3 设计参数及运算	119
5.3.5 混凝土的变形	88	5.7.4 强度标准差	120
5.3.6 混凝土的徐变	91	5.7.5 配制强度	120
5.4 混凝土外加剂	93	5.7.6 水灰比	121
5.4.1 化学外加剂的定义	93	5.7.7 基本参数	124
5.4.2 化学外加剂的品种及制备	94	5.7.8 骨料用量的两种计算法	126
5.4.3 膨胀剂	100	5.7.9 综合例题	127
5.4.4 混凝土外加剂的适用范围	103	5.7.10 试配、调整及确定	129
5.4.5 应用外加剂的注意事项	105	5.8 水泥混凝土技术进展	133
5.4.6 混凝土外加剂的现状和发展方向	106	5.8.1 第一次变革	133
5.5 混凝土掺和料	109	5.8.2 第二次变革	133
5.5.1 超细掺和料的品种与性能	109	5.8.3 第三次变革	133
5.5.2 超细活性掺和料在混凝土中的作用	111	5.8.4 第四次变革	134
5.6 混凝土的质量控制	115	思考题与习题	137
5.6.1 强度概率分布——正态分布	115		
第6章 沥青材料	139		
6.1 石油沥青	139	6.2 其他品种沥青	154
6.1.1 石油沥青的分类	139	6.2.1 煤沥青	154
6.1.2 石油沥青的生产工艺简介	140	6.2.2 乳化沥青	157
6.1.3 石油沥青的组成和结构	140	6.2.3 改性沥青	160
6.1.4 石油沥青的技术性质	143	6.2.4 再生沥青	162
6.1.5 石油沥青的技术标准	152		
第7章 沥青混合料	164		
7.1 热拌沥青混合料	165	7.3.2 粗集料	171
7.1.1 沥青混合料的组成结构	165	7.3.3 细集料	174
7.1.2 沥青混合料的组成结构类型	166	7.3.4 填料	174
7.1.3 沥青混合料的强度理论	166	7.4 热拌沥青混合料配合比设计方法	175
7.1.4 影响沥青混合料强度的因素	167	7.4.1 矿质混合料的配合组成设计	175
7.2 热拌沥青混合料的路用性能指标评价	168	7.4.2 确定沥青混合料的最佳沥青用量	176
7.2.1 高温稳定性	168	7.5 其他常见沥青混合料	180
7.2.2 低温开裂性	170	7.5.1 SMA 混合料简介	180
7.2.3 耐久性	170	7.5.2 常温沥青混合料	181
7.2.4 抗滑性	171	7.5.3 沥青稀浆封层混合料	181
7.3 热拌沥青混合料组成材料的性质	171	7.5.4 桥面铺装材料	182
7.3.1 沥青	171	7.5.5 多孔隙沥青混凝土磨耗层	183

7.5.6 水泥混凝土路面填料	184	7.5.8 纤维加筋沥青混凝土	185
7.5.7 再生沥青混凝土	185	思考题与习题	186
第8章 建筑钢材	187		
8.1 钢的生产与分类	187	8.3.3 硬度	193
8.1.1 钢的生产	187	8.3.4 疲劳强度	194
8.1.2 钢的分类	188	8.4 建筑钢材的工艺性能	194
8.2 钢的晶体组织、化学成分及其对性能的影响	189	8.4.1 冷弯性能	194
8.2.1 钢的基本晶体组织及其对性能的影响	189	8.4.2 冷加工性能及时效强化	195
8.2.2 钢的化学成分及其对性能的影响	190	8.4.3 焊接性能	195
8.3 建筑钢材的主要力学性能	191	8.5 建筑钢材的品种与选用	196
8.3.1 抗拉性能	191	8.5.1 建筑钢材的主要钢种	196
8.3.2 冲击韧性	192	8.5.2 常用建筑钢材	198
		8.6 钢材的防火与防腐蚀	201
		8.6.1 钢材的防火	201
		8.6.2 钢材的腐蚀与防止	202
第9章 木材	204		
9.1 木材的分类与构造	204	9.3 木材的防腐及防火	211
9.1.1 木材的分类	204	9.3.1 木材的防腐	211
9.1.2 木材的结构	204	9.3.2 木材的防火	212
9.2 木材的主要性能	206	9.4 木材的等级及应用	212
9.2.1 化学性质	206	9.4.1 木材的等级	212
9.2.2 物理性质	206	9.4.2 木材的应用	213
9.2.3 木材的力学性质	208	思考题与习题	213
第10章 砌筑材料	214		
10.1 建筑砂浆	214	10.3 天然石材	227
10.1.1 砌筑砂浆	214	10.3.1 石材的分类	227
10.1.2 抹面砂浆	218	10.3.2 石材的技术性质	228
10.2 砌墙砖	221	10.3.3 石材的应用	230
10.2.1 烧结砖	221	10.4 人造石材	231
10.2.2 硅酸盐砖	225	思考题与习题	231
10.2.3 砌块	225		
第11章 工程高分子聚合物材料	232		
11.1 概述	232	11.2.3 建筑塑料的特性	234
11.1.1 高分子化合物的分类	232	11.2.4 土木工程中常用的塑料制品	234
11.1.2 高分子化合物的结构	233	11.3 建筑胶黏剂	236
11.2 建筑塑料	233	11.3.1 建筑胶黏剂的黏结机理	237
11.2.1 建筑塑料的组成	233	11.3.2 常用的建筑胶黏剂	237
11.2.2 建筑塑料的分类	234	思考题与习题	238
第12章 建筑功能材料	239		
12.1 建筑功能材料概述	239	12.2.2 防水材料的性能与选用	239
12.2 建筑防水材料	239	12.3 绝热保温材料	243
12.2.1 防水材料的分类	239	12.3.1 绝热材料的性能要求	243

12.3.2 绝热材料的结构与应用	243	12.6 建筑光学功能材料	250
12.3.3 绝热材料的种类、性能	243	12.6.1 光学特性及光学功能材料分类	250
12.4 吸声与隔声材料	246	12.6.2 玻璃	251
12.4.1 隔声材料	246	12.7 建筑功能材料的新发展	251
12.4.2 吸声材料	247	12.7.1 智能化建材	251
12.4.3 隔声材料与吸声材料的区别与 联系	248	12.7.2 绿色建筑功能材料	251
12.5 建筑防火材料	249	12.7.3 复合多功能建材	252
		12.7.4 新型功能材料应用举例	252
附录 常用土木工程材料试验	253		
试验 1 材料密度、体积密度、孔隙率和吸水 率的试验	253	试验 3 集料试验	262
试验 2 水泥试验	256	试验 4 混凝土试验	268
		试验 5 钢筋试验	273
参考文献	276		

第 1 章 绪 论

1.1 土木工程材料的定义和基本要求

土木工程材料是指用于土木建筑结构物中所有材料的总称，广义的土木工程材料不仅包括建筑物自身的所有材料，如砂石、水泥、石灰、混凝土、钢材、沥青、沥青混合料、装饰材料等，还包括施工过程中的辅助材料和建筑器材。狭义上的土木工程材料仅指直接构成工程实体的所有材料。工程实体包括建筑工程、桥梁工程、公路与城市道路工程、铁道工程、隧道工程、水利工程、港口工程、海洋工程、给水排水工程、环境工程等中的建筑物和构筑物。土木工程材料是一切土木工程的重要物质基础，在我国国民经济建设中占有举足轻重的地位。虽然土木工程材料种类繁多，性能各异，但是由于其在很大程度上决定了土木工程的坚固性、适用性、耐久性和美观，因此，土木工程材料一般应满足下列基本要求：①足够的强度，能安全地承受设计荷载；②较轻的自重，减少下部结构和地基的负荷；③良好的耐久性，减少后期的维修费用。

除以上三点外，还应具有一定的装饰性和特殊部位相应的特殊功能，如屋面材料要能隔热、防水等。

1.2 土木工程材料的分类

工程中常从不同角度对土木工程材料进行分类。

(1) 按化学成分分类 根据化学成分的不同，土木工程材料分为无机材料、有机材料和复合材料三大类，各大类又分为不同的小类，详见表 1-1。

表 1-1 常用土木工程材料按化学成分的分类

无机材料	金属材料	黑色金属：铁、建筑钢材
		有色金属：铜、铝、铝合金
	无机非金属材料	天然材料：石材、砂、碎石
		无机结合料：石灰、石膏、水泥
		烧结制品：砖、瓦、玻璃、陶瓷
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
	高聚物材料	塑料、橡胶、有机涂料、胶黏剂
复合材料	无机非金属复合材料	水泥混凝土、砂浆、无机结合料、稳定混合料
	金属-无机非金属材料	钢筋混凝土、钢纤维混凝土
	有机-无机非金属材料	玻璃钢、聚合物混凝土、沥青混凝土

(2) 按功能分类

① 结构材料：承受荷载作用的材料，如构筑物的基础、梁、板、柱等。

② 功能材料：具有其他功能的材料，如防水材料、保温材料、绝热材料等。

(3) 按用途分类 分为桥梁结构材料、港工结构材料、建筑结构材料、建筑墙体材料、建筑防水材料等。

1.3 材料在土木工程中的地位

(1) 材料是保证土木工程质量的基础 在土木工程中，从材料的选择、生产、使用、检验评定，到材料的贮藏、运输和保管，任何环节的失误都可能造成工程的质量缺陷甚至是工程质量事故。因此，使用合格的土木工程材料是保证工程质量的关键。

(2) 材料是影响土木工程造价的重要因素 在一般土木工程的总造价中，50%以上源自材料，并且随着建筑级别和档次的提高，材料所占比例不断提高。因此，在满足工程各项使用要求的条件下，正确使用土木工程材料，可显著降低工程成本。

(3) 材料促进土木工程的技术革新 土木工程材料的品种、质量和规格在一定程度上影响着建筑设计和结构设计的形式和施工方法。因此，材料性能的改进和应用技术的进步，将直接推动土木工程的技术进步，工程建设中要实现新设计、新技术、新工艺，研制新材料至关重要；同样新材料的出现又会推动新技术的发展。

1.4 土木工程材料的发展歷程和方向

土木工程材料从远古时代到现在发生了很大的变化，它既是人类文明和社会进步的产物，又是社会生产力发展水平的标志。回顾土木工程材料的发展歷程，不禁为人类征服自然和改造自然的成果感到骄傲和自豪，但同时也给人类赖以生存的自然环境造成了很多负面效应。

在原始社会人类过着群居生活，只能利用天然的洞穴作为栖息之地，狩猎使用的工具也是天然的石材和木棍。公元前6世纪前后的新石器时代，人类定居下来，学会了制造工具，学会了用天然石材和天然胶凝材料建造房屋和纪念碑，建于公元前2500左右的埃及金字塔是目前现存的最古老的天然石灰和石材建筑物。公元前800年左右开始出现的烧土制品，是人类最早加工使用的人工建筑材料。18世纪开始的欧洲工业革命，揭开了建筑材料发展的新纪元，最有标志性的是水泥、钢材和混凝土的发明和应用。19世纪末20世纪初，预应力混凝土和减水剂的发明，推进了钢筋混凝土技术的大飞跃。以塑料和合成树脂为代表的高分子有机材料是20世纪具有代表性的新型材料。近代社会人类利用钢铁、水泥、混凝土等结构材料及塑料、铝合金、不锈钢等新型材料建造了拔地而起的高楼、贯穿水底的隧道、横跨海峡的大桥及高耸云霄的电视台等令人叹为观止的建筑。

随着社会生产力的发展，越来越多的新技术和工艺应用于土木工程材料的研制开发，使得土木工程材料的发展日新月异。土木工程材料的发展除满足结构的基本要求之外，如何减少对资源和能源的消耗、减少对环境的污染及如何满足日益多样的功能性要求等是未来的重要研究方向。

1.5 工程技术标准

每种材料必须满足相应的使用条件和使用环境，因此要求材料的技术性质应达到某一要

求,这一要求就是标准。准确地说,标准是以科学技术和实践经验的综合成果为基础,经有关各方面协商一致,由主管机构批准,以特定形式发布,作为共同遵守的准则和依据。简而言之,标准就是对某项技术或产品实行统一执行的要求。土木工程标准是指对各类工程的勘察、规划、设计、施工、安装、验收等需协调统一的事项所制定的规范。土木工程材料标准是工程中检验所使用材料质量的依据。我国现行常用的标准分为四类:国家标准、行业标准、地方标准和企业标准。

国家标准为国家标准局发布的全国性的指导技术文件,分为强制性国家标准(代号GB)和推荐性国家标准(代号GB/T,为非强制性),如“GB 175—2007 通用硅酸盐水泥”,其中“GB”为国家标准代号,“175”为标准编号,“2007”为标准颁布年代号,“通用硅酸盐水泥”为该标准的产品名称。

行业标准也是国家性的指导技术文件,但它由主管总局(或生产部)发布。建工行业代号为JG,如JGJ 55—2000(水泥混凝土配合比设计规程);交通行业代号为JT,如JTGE42—2005(公路工程集料试验规程);建材行业代号为JC,如JC/T 479—92(建筑生石灰)。

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。企业标准仅适用于本企业,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。国家鼓励地方和企业制定技术指标要求高于国家标准的地方标准和企业标准。

随着我国在国际上影响力的加大和国外项目承接量的增多,可能采用一些与土木工程材料密切相关的国际标准或某国的标准,主要有:国际标准,代号为ISO;美国材料与试验学会标准,ASTM;德国工业标准,代号为DIN。技术标准是判别材料是否合格的准绳,只有按照相关标准进行检验和使用,才能确保土木工程的质量和使用寿命。

1.6 本课程的地位和学习任务

本课程是一门基础技术课程(专业基础课),与物理、化学等基础课及材料力学、工程地质等基础技术课有密切的联系,又是学习土木工程、工程管理、建筑学、给排水等专业课的基础,同时为今后从事专业技术工作时合理选择和使用土木工程材料打下基础。

土木工程材料种类繁多,内容庞杂,且各类自成体系。本课程的主要学习任务是:掌握常用土木工程材料的技术性质和主要影响因素;了解各种材料的内部组成结构及其与技术性能之间的关系,学会合理选用材料;熟悉常用材料的分类、规格、应用范围及适用的标准;了解材料的产源、加工工艺对其性能的影响,材料存在的问题和改善,以及保管和运输材料等问题。

第2章 土木工程材料的基本性质

土木工程材料在实际使用中要承受复杂的作用，因此，要求土木工程材料必须具备相应的性质。本课程所指的材料的性质是指基本性质，即材料处于不同的使用条件和使用环境时，通常必须具备的性质。

2.1 材料的组成和结构

2.1.1 材料的组成

材料的组成是决定材料的化学性质、物理、力学性质的最基本因素。

(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。金属材料以化学元素含量表示；无机非金属材料通常用各种氧化物含量的百分数表示；聚合物以有机元素链节重复形式表示。

(2) 矿物组成 将材料中具有特定的晶体结构、特定的物理力学性能的组成结构称为矿物。矿物组成是指构成材料的矿物的种类和数量。矿物组成是在化学组成确定条件下影响材料性质的重要因素。

(3) 相组成 将材料中结构相近、性质相同的均匀部分称为相。自然界的物质可分为气相、液相和固相。同一种材料可由多相物质组成，大多数土木工程材料属于多相固相。

凡由两相或两相以上物质组成的材料称为复合材料。如，混凝土是主要由黏结介质（基相）和埋在其中的骨料粒子或碎片（骨料相）组成的两相复合材料。

2.1.2 材料的结构

材料的结构分为宏观结构、细观结构和微观结构，是决定材料性质的重要因素之一。

(1) 宏观结构 宏观结构是指用肉眼或放大镜就能够观察到的粗大组织。

材料宏观结构按其空隙特征可分为：

- ① 致密结构。致密结构指孔隙率很低或趋近为零的材料，如钢材、玻璃和塑料等。
- ② 多孔结构。多孔结构指材料孔隙率高的结构，如加气混凝土、多孔砖等。
- ③ 微孔结构。微孔结构是指具有微细孔隙的结构。如石膏制品、烧结黏土制品等。

按存在形态或构造特征分为：

① 纤维结构。纤维结构是由天然或人工合成纤维状物质构成的结构，如木材、钢纤维等。

② 层状结构。层状结构是指天然形成或人工采用黏结等方法将材料叠合成层状的结构，如胶合板、纸面石膏板等。

③ 粒状结构。粒状结构是指材料呈松散颗粒状结构，如砂石、粉煤灰等。

④ 堆聚结构。堆聚结构是指由集料和黏结介质胶结而成的结构，如水泥混凝土、沥青混合料等。

(2) 细观结构 细观结构是指在光学显微镜下能观察到得结构，材料的细观结构只能针

对某种具体土木工程材料来进行分类研究,如混凝土可分为基相、集料相、界面相;钢铁可分为铁素体、渗碳体、珠光体;木材可分为木纤维、导管髓线、树脂道。

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性能有重要影响。

(3) 微观结构 材料微观结构是指用电子显微镜或 X 射线来分析研究的原子、分子层次的结构。材料微观结构可分为晶体、玻璃体和胶体。

① 晶体。在空间上,质点(离子、原子、分子)按特定的规则呈周期性排列的固体称为晶体。晶体具有特定的几何外形、固定的熔点和化学性质。

② 玻璃体。呈熔融状态材料在急速冷却时,其质点来不及或因某种原因不能按规则排列就产生凝固所形成的结构称为玻璃体。玻璃体又称无定型体或非晶体,结构特征为质点在空间上呈非周期性排列。

玻璃体是化学不稳定性结构,容易与其他物质起化学作用,具有较高的化学活性。如粉煤灰、水淬粒化高炉矿渣、火山灰等玻璃体材料,能与石膏、石灰或水泥在有水的条件下水化和硬化,通常作为混合材料掺入水泥中。

③ 胶体。胶体是指粒径为 $1\sim 100\mu\text{m}$ 的胶粒分散在连续相介质中所形成的结构。根据胶粒与分散介质的相对比例不同,胶体结构分为溶胶、溶凝胶和凝胶。

2.2 材料的物理性质

2.2.1 基本物理性质

2.2.1.1 材料的孔隙和体积

(1) 孔隙 大多数土木工程材料由于多余水分的蒸发、发泡剂的作用或焙烧作用,在宏观或细观结构层次上含有一定数量和大小的孔隙。孔隙按其形态特征可分为以下三种。

① 连通孔隙或开口孔隙:孔隙之间互相连通且与外界相通。

② 封闭孔隙或闭口孔隙:孔隙是孤立的,彼此不连通,孔壁致密。

③ 半封闭孔隙:孔隙是孤立的,但孔壁粗糙,有一定的透水性和透气性。

(2) 体积 材料的体积是指材料占据的空间大小。根据材料所处物理状态的不同,体积分为以下三种。

① 堆积体积。散粒状材料(砂、石、水泥等)在堆积状态下的总体外观体积称为堆积体积。堆积体积是矿质实体体积和颗粒之间的空隙体积之和。同一种材料在松散堆积状态下的体积较大,在密实堆积状态下的体积较小。材料的堆积体积,常以材料填充容器的容积大小来测量。

② 表观体积。含孔材料在自然状态下的体积称为表观体积。表观体积包括矿质实体的体积和孔隙体积,而孔隙体积指的是开口孔隙和闭口孔隙体积之和。

规则外形材料的表观体积可通过测量其外形尺寸,用几何公式计算得到,不规则外形材料的表观体积可用排水法测得。为了防止测定体积时开口孔隙进水和水分的渗入,测定时材料颗粒表面涂蜡。

③ 绝对密实体积。材料内部没有孔隙时的体积或不包括内部孔隙的材料体积称为材料的绝对密实体积。除个别材料如玻璃、钢铁、沥青等,在自然状态下能直接测定其绝对密实体积外,大多数材料在自然状态下含有孔隙。测量含孔材料的绝对密实体积的方法是先将材料粉碎磨细成粉状,消除材料内部孔隙,再用李氏瓶法测定粉末体积。测定结果的准确性与粉末的粗细有关,材料粉磨得越细,测定结果越准确。

含孔材料的体积构成见图 2-1。

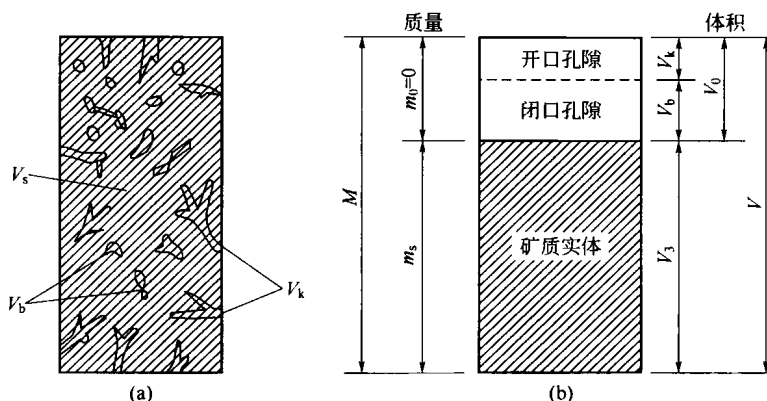


图 2-1 含孔材料体积与质量构成示意图

(a) 组成结构外观示意图；(b) 质量与体积关系示意图

2.2.1.2 材料的密度、表观密度和堆积密度

(1) 密度 密度是指材料在绝对密实状态下单位体积的质量。计算式如下：

$$\rho = \frac{M}{V_s}$$

式中， ρ 为密度， g/cm^3 ； M 为材料的质量， g ； V_s 为材料的绝对密实体积， cm^3 。

因材料质量的称量是在空气中，所以矿质实体的质量就是材料的质量，见图 2-1。材料密度仅由材料的组成和材料的结构决定，与材料所处的环境、材料干湿和孔隙无关，故密度是材料的特征指标。

(2) 表观密度 表观密度是指材料在自然状态下单位体积的质量，计算式如下：

$$\rho_0 = \frac{M}{V}$$

式中， ρ_0 为表观密度， g/cm^3 或 kg/m^3 ； M 为材料的质量， g 或 kg ； V 为材料的表观体积即材料在自然状态下的体积， cm^3 或 m^3 。

对于含孔材料的表观密度，根据表观体积计算的不同分为两种：第一种是当考虑开口孔隙和闭口孔隙体积时计算得到的表观密度，也称为体积密度；第二种是忽略开口孔隙体积时计算得到的表观密度，也称为视密度，如砂、石等。对于密实材料，由于开口孔隙和闭口孔隙的体积都很小，所以，在精度要求不高的情况下，材料的表观密度特别是干表观密度值可代替密度值，如水泥、粉煤灰、磨细生石灰粉等。

当材料处在不同的含水状态或环境，表观密度的大小也会变化，故表观密度值必须注明含水情况。一般情况下，未注明者常指气干状态下的表观密度，而在干燥状态下测得的表观密度称为干表观密度。

(3) 堆积密度 堆积密度是指散粒状材料（砂、石、水泥等）在自然堆积状态规定填装条件下单位体积的质量，计算式如下：

$$\rho' = \frac{M}{V'}$$

式中， ρ' 为堆积密度， kg/m^3 ； M 为材料的质量， kg ； V' 为材料的堆积体积， m^3 。

堆积密度的大小与材料装填于容器中的条件或堆积状态有关。自然堆积体积计算的密度为松堆积密度，以振实体积计算的则为紧堆积密度。工程上通常所说的堆积密度是指松堆积密度。

对于同一种材料，由于材料内部存在空隙和孔隙，故一般有密度大于表观密度、表观密度大于堆积密度。

密度、表观密度和堆积密度的数据,在土木工程施工中常用于材料用量的计算、构件自重计算、配料计算及确定运输量等,几种常用土木工程材料的三种密度数据见表2-1。

表2-1 常用土木工程材料的密度、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)
钢材	7.85	—	—
水泥	2.8~3.2	—	1200~1300
碎石(石灰岩)	2.6~2.8	2300~2800	1400~1700
砂	2.5~2.8	—	1450~1650
粉煤灰	1.95~2.40	—	550~800
普通混凝土	—	2400~2500	—
空心黏土砖	2.5~2.7	1000~1400	—
玻璃	2.45~2.55	2450~2500	—
红松木	1.55~1.60	400~600	—
石油沥青	0.96~1.04	—	—
泡沫塑料	—	20~50	—

2.2.1.3 材料的密实度和孔隙率

(1) 密实度 密实度是指材料的体积内被矿质实体充实的程度,计算公式如下:

$$D = \frac{V_s}{V} \times 100\% \quad \text{或} \quad D = \frac{\rho_0}{\rho} \times 100\%$$

(2) 孔隙率 孔隙率是指材料中孔隙的体积与材料自然状态下的总体积之比,计算公式如下:

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

孔隙率的大小表明材料孔隙的多少,它对材料的影响恰好与密实度影响相反,两者关系为:

$$P + D = 1$$

(3) 开口孔隙率和闭口孔隙率 开口孔隙率是指材料被水充满的孔隙体积与材料的表观体积之比,计算公式如下:

$$P_K = \frac{M_b - M}{V} \times \frac{1}{\rho_w} \times 100\%$$

式中, P_K 为开口孔隙率; M_b 为水饱和状态下材料的质量, g; ρ_w 为水的密度, 常温下取 1g/cm^3 ; 其他符号意义同前。

闭口孔隙率为总孔隙率与开口孔隙率之差, 即:

$$P_B = P - P_K$$

材料孔隙率的大小和孔隙特征直接影响材料的多种性质, 对于同种材料, 孔隙率相同时, 其性质不一定相同。

2.2.1.4 材料的填充率与空隙率

(1) 填充率 填充率是指散粒状材料颗粒体积与堆积体积之比的百分率。计算公式如下:

$$D' = \frac{V}{V'} \times 100\% \quad \text{或} \quad D' = \frac{\rho'}{\rho_0} \times 100\%$$

(2) 空隙率 空隙率是指散粒状材料在堆积体积中, 颗粒间空隙体积与堆积体积之比的百分率。计算公式如下:

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

空隙率的大小反映了散粒状材料的颗粒之间互相填充的程度，如在配制混凝土和砂浆时，为了节约水泥，基本思路是粗集料空隙被细集料填充，细集料空隙被粉填充，粉空隙被胶凝材料填充，以达到节约胶凝材料的效果。

2.2.2 材料与水有关的性质

(1) 材料的亲水性与憎水性 受材料本身性质的影响，当材料在空气中与水接触时，表现出不同的润湿情况，见图 2-2。

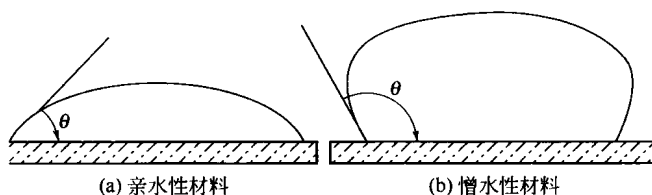


图 2-2 材料润湿示意图

在材料、水和空气的交点处，沿水滴表面做切线，此切线与水和材料接触面所成的夹角 θ 称为润湿边角。润湿边角越小，材料越容易润湿。当润湿边角 $\theta = 0$ 时，说明该材料完全被水润湿。当润湿边角 $\theta \leq 90^\circ$ 时，水分子之间的黏聚力小于水分子与材料之间的相互吸引力，此种材料称为亲水性材料；当润湿边角 $\theta > 90^\circ$ 时，水分子间的内聚力大于水分子与材料之间的相互吸引力，此种材料称为憎水性材料。上述概念也适用于其他液体对材料的润湿情况，相应称为亲液材料或憎液材料。

土木工程中的多数材料为亲水性材料，如集料、普通砂浆和混凝土等，水能在其表面铺展开，且能通过毛细管作用自动吸入材料内部；多数高分子有机材料为憎水性材料，如塑料、沥青等，水不能在材料铺展，且更难以渗入材料的毛细管中。

(2) 材料的吸水性 材料浸入水中吸入水分的能力为吸水性，用吸水率表示，吸水率用质量吸水率和体积吸水率两种方式表达。

① 质量吸水率。质量吸水率是材料吸水饱和状态下，所吸水的质量与材料干质量之比的百分数，质量吸水率 W_m 的计算式如下：

$$W_m = \frac{M_2 - M}{M} \times 100\%$$

式中， W_m 为质量吸水率，%； M_2 为材料吸水饱和状态下的质量，g 或 kg； M 为材料在干燥状态下的质量，g 或 kg。

② 体积吸水率。体积吸水率是材料吸水饱和状态下，所吸收的水的体积与材料自然体积之比的百分数，体积吸水率 W_v 的计算式如下：

$$W_v = \frac{M_2 - M}{V} \times \frac{1}{\rho_w} \times 100\%$$

式中， W_v 为体积吸水率，%； M_2 为材料吸水饱和状态下的质量，g 或 kg； M 为材料在干燥状态下的质量，g 或 kg； V 为材料在自然状态下的体积， cm^3 ； ρ_w 为水的密度，常温取 1.0 g/cm^3 。

材料的质量吸水率与体积吸水率之间的关系为：

$$W_m = W_v \times \rho_0$$

式中， ρ_0 为材料在干燥状态下的表观密度， g/cm^3 。

一般如未加说明，吸水率均指质量吸水率。

材料的吸水率, 不仅与材料的亲水性或憎水性有关, 还与孔隙率的大小和孔隙形态有关。一般孔隙率愈大, 吸水率也愈大; 水分不易进入闭口孔隙, 而粗大开口孔隙也不易吸满水分; 具有较多微小开口且连通孔隙(毛细孔)的材料吸水率比较大。

不同材料由于孔隙率和孔隙结构的差异, 吸水率相差很大, 如花岗岩等致密岩石的吸水率仅为 0.02%~0.7%, 普通混凝土为 2%~4%, 烧结普通砖为 8%~20%, 而多孔材料的吸水率常大于 100%。

材料吸水对材料的许多性质产生不利影响, 如吸水率增大会使材料的体积膨胀, 表观密度和导热性增大, 强度和抗冻性下降。

(3) 材料的吸湿性 材料在潮湿空气中吸收水分的性质称为吸湿性, 材料的吸湿性用含水率表示。

材料所含水的质量与材料干质量比值的百分数称为含水率, 计算公式为:

$$W_h = \frac{M_r - M}{M} \times 100\%$$

式中, W_h 为含水率, %; M_r 为材料在潮湿状态下的质量, g 或 kg; M 为材料在干燥状态下的质量, g 或 kg。

材料含水率的大小不仅与材料的孔隙有关, 而且还受所处环境中空气湿度的影响。材料的吸湿作用是可逆的, 当较干燥的材料处于较潮湿的空气中时, 可吸收空气中的水分; 而当较潮湿的材料处于较干燥的空气中时, 会向空气中放出水分。当材料与空气湿度达到平衡时的含水率称为材料的平衡含水率。吸湿对材料的性能也会带来不利影响, 如增加自身质量、降低强度和耐久性等。

(4) 材料的耐水性 材料的耐水性是指材料长期在水的作用下不破坏、强度也不显著降低的性质, 包括广义耐水性和狭义耐水性。广义耐水性是水对材料的力学性质、光学性质、装饰性等多方面的劣化作用。狭义耐水性是水对材料的力学性质及结构性质的劣化作用。常用软化系数作为衡量指标, 并以 K_R 表示:

$$K_R = \frac{f_b}{f_g}$$

式中, K_R 为材料的软化系数; f_b 为材料在吸水饱和状态下的抗压强度, MPa; f_g 为材料在干燥状态的抗压强度, MPa。

软化系数反映了材料饱水后强度降低的程度。一般材料遇水后, 由于水分子在材料表面的定向吸附, 会削弱内部质点的结合力, 导致强度都有不同程度的降低。所以, 材料软化系数在 0~1 之间。如花岗岩长期浸泡在水中, 强度将下降 3%, 黏土砖和木材吸水后强度降低更大。

软化系数的大小, 是选择耐水材料的重要依据。软化系数小的材料耐水性差, 使用环境受限制。通常称软化系数大于 0.85 的材料为耐水性材料, 其可用于长期受水浸泡或处于潮湿环境的建筑物。

(5) 材料的抗渗性 材料的抗渗性是指材料抵抗压力水渗透的性质。材料的抗渗性用渗透系数或抗渗等级来表示。

① 抗渗系数

$$K = \frac{Qd}{AtH}$$

式中, K 为渗透系数, cm/h; Q 为透水量, cm³; d 为试件厚度, cm; A 为透水面积, cm²; t 为时间, h; H 为静水压力水头, cm。

渗透系数越小, 表示材料渗透的水量越少, 材料抗渗性也越好。土木工程中材料的防水