

普通高等教育“十二五”规划教材

土木工程材料

TUMU GONGCHENG CAILIAO

郑娟荣 主编



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

TUMU GONGCHENG CAILIAO

郑娟荣 主编



化学工业出版社

本教材为普通高等教育“十二五”规划教材。主要包括绪论、土木工程材料的基本性质、无机胶凝材料、混凝土与砂浆、建筑金属材料、沥青及沥青混合料、砌体材料、合成高分子材料、木材、建筑功能材料,附录是常用土木工程材料试验。除绪论和附录外,每章后面附有适量的思考题。

本书采用最新国家标准和行业标准,注意了深度和广度之间的适当平衡,在重点讲述土木工程材料的基本性质、无机胶凝材料、混凝土、沥青混合料等的基础上,广泛介绍了国内目前土木工程中常用的各种土木工程材料及其发展中的有关新材料、新技术,以利于开阔新思路 and 合理选用土木工程材料。

本书可作为普通高等院校土木建筑类专业本科生学习用书,也可作为土木建筑类有关设计、施工、科研和管理等专业人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

土木工程材料/郑娟荣主编. —北京:化学工业出版社, 2014. 5
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-122-20083-9

I. ①土… II. ①郑… 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 (2014) 第 049614 号

责任编辑: 满悦芝
责任校对: 宋 夏

文字编辑: 刘丽菲
装帧设计: 杨 北

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 装: 三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张 15 $\frac{3}{4}$ 字数 400 千字 2014 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: 39.80 元

版权所有 违者必究

前 言

土木工程材料课程是一门土木建筑类各专业本科生的专业基础课，教学目的有两个方面：一是为学生学习后继专业课程提供必要的基础知识，使学生毕业后在设计、施工、监理、检测等工作中能够合理选用土木工程材料；二是为学生毕业后从事土木工程结构与材料等方向的科学研究准备必要的基础知识。本书主要有以下突出特点：首先，全书在编写过程中注意了面和点、深度和广度之间的适当关系，在重点突出水泥、水泥混凝土、沥青混合料及材料基本性能的基础上，广泛地介绍了目前国内已有的各种土木工程材料的知识及其发展和有关的新材料、新技术，以利于开阔思路，便于合理选择土木工程材料。其次，在涉及主要土木工程材料（水泥、水泥混凝土、建筑金属材料、沥青混合料）中，重点让学生掌握材料的组成、结构、性能和应用及发展趋势之间的关系，以便让学生从材料的组成、结构层次来理解材料的性能特点，以利于培养学生的创新性思维。本书各章节内容体现了最新标准、规范和已经广泛应用的新成果，并附有相应的试验内容，体现学以致用，实用性强。

本教材可以作为大学本科土木建筑类各个专业，包括土木工程、桥梁工程、地下建筑工程、交通工程、水工结构工程、建筑工程管理、建筑学等专业的本科生学习土木工程材料专业基础课的教科书；也可作为土木建筑类有关设计、施工、科研人员的参考书。

本书由郑娟荣主编。各章编写人员是：郑州大学郑娟荣（绪论，第1、3章部分内容，第7、8、9章），郑州大学元成方（第3章部分内容，附录），郑州大学汤寄予（第5章），河南大学秦守婉（第2、6章），华北水利水电大学齐新华（第4章）。

由于编者水平有限，书中的缺点和不妥之处在所难免，恳请读者在使用过程中给予指正，并提出宝贵意见。谢谢。

编者

2014年6月

目 录

第0章 绪论	1	2.3.1 菱苦土的生产	27
0.1 土木工程材料的定义和分类	1	2.3.2 菱苦土的胶凝机理	27
0.2 土木工程材料的发展趋势	1	2.3.3 菱苦土的应用	28
0.3 土木工程材料的重要性和标准化	2	2.4 水玻璃	28
0.4 土木工程材料课程的教学目的与学习方法	3	2.4.1 水玻璃的组成	28
第1章 土木工程材料的基本性质	4	2.4.2 水玻璃的生产	28
1.1 材料的组成和结构	4	2.4.3 水玻璃的硬化	29
1.1.1 材料的组成	4	2.4.4 水玻璃的特性	29
1.1.2 材料的结构	4	2.4.5 水玻璃的应用	29
1.2 材料的基本物理性质	7	2.5 水泥	30
1.2.1 密度、表观密度、体积密度和堆积密度	7	2.5.1 硅酸盐水泥	30
1.2.2 材料的孔隙率和空隙率	9	2.5.2 掺混合材料的水泥	37
1.2.3 材料与水有关的性质	10	2.5.3 其他品种水泥	41
1.2.4 材料的热工性质	12	2.5.4 无机胶凝材料的新发展	45
1.3 材料的基本力学性质	14	思考题	46
1.3.1 材料的强度和比强度	14	第3章 混凝土与砂浆	47
1.3.2 弹性和塑性	16	3.1 混凝土的特点及分类	47
1.3.3 脆性和韧性	16	3.1.1 混凝土的特点	47
1.3.4 硬度和耐磨性	16	3.1.2 混凝土的分类	47
1.4 材料的耐久性	16	3.2 混凝土的结构	48
1.4.1 材料的耐久性与安全性	17	3.2.1 集料	48
1.4.2 材料的耐久性与可持续发展	17	3.2.2 硬化水泥浆体	48
思考题	17	3.2.3 过渡区	50
第2章 无机胶凝材料	19	3.3 混凝土的组成材料	51
2.1 石灰	19	3.3.1 水泥	51
2.1.1 生石灰的生产、分类与标记	19	3.3.2 细集料(俗称砂)	51
2.1.2 石灰的消化和硬化	20	3.3.3 粗集料(石子)	55
2.1.3 建筑生石灰的技术要求	21	3.3.4 混凝土拌合及养护用水	58
2.1.4 石灰的特性	22	3.3.5 混凝土外加剂	58
2.1.5 石灰的应用	22	3.3.6 混凝土掺合料	62
2.1.6 贮运注意事项	23	3.4 混凝土拌合物的性能	64
2.2 石膏	23	3.4.1 和易性	64
2.2.1 建筑石膏的生产	23	3.4.2 影响和易性的主要因素	66
2.2.2 建筑石膏的凝结与硬化	24	3.4.3 混凝土拌合物的凝结时间	68
2.2.3 石膏的技术要求	25	3.5 硬化混凝土的力学性能	69
2.2.4 建筑石膏的特性	25	3.5.1 混凝土的强度	69
2.2.5 建筑石膏的应用	26	3.5.2 影响混凝土强度的因素	70
2.3 菱苦土	27	3.6 混凝土的体积稳定性	74
		3.6.1 混凝土早期的体积变化	74
		3.6.2 硬化混凝土的体积变化	75

3.7 硬化混凝土的耐久性	78
3.7.1 混凝土的抗渗性	78
3.7.2 混凝土的抗冻性	80
3.7.3 混凝土的抗侵蚀性	80
3.7.4 混凝土的碳化	80
3.7.5 碱-集料反应	81
3.7.6 混凝土的氯离子侵蚀	81
3.7.7 混凝土中钢筋的锈蚀	81
3.7.8 混凝土的表面磨损	81
3.8 混凝土质量控制与配制强度	82
3.8.1 混凝土的质量控制	82
3.8.2 混凝土强度的波动规律和 保证率	82
3.8.3 混凝土配制强度	84
3.9 普通混凝土的配合比设计	84
3.9.1 混凝土配合比设计基本要点	84
3.9.2 普通混凝土配合比设计步骤	84
3.9.3 普通混凝土配合比设计的实例	91
3.10 特种混凝土	93
3.10.1 高性能混凝土	93
3.10.2 纤维混凝土	94
3.10.3 轻质混凝土	95
3.10.4 聚合物混凝土	96
3.10.5 喷射混凝土	97
3.10.6 绿色混凝土	97
3.11 砂浆	98
3.11.1 砂浆的分类、组成材料及技术 性质	98
3.11.2 砌筑砂浆的配合比设计	100
3.11.3 抹面砂浆	103
3.11.4 预拌砂浆	104
思考题	105

第4章 建筑金属材料

4.1 钢材的冶炼与分类	108
4.1.1 钢材的冶炼	108
4.1.2 钢材的分类	109
4.2 建筑钢材的主要技术性能	110
4.2.1 建筑钢材的主要力学性能	110
4.2.2 建筑钢材的工艺性能	113
4.3 钢材的化学成分及组织结构	115
4.3.1 钢材的主要化学成分	115
4.3.2 钢材的晶体结构	115
4.3.3 钢材的基本晶体组织	116
4.4 钢材的加工	116
4.4.1 轧制	116
4.4.2 冷加工	117

4.4.3 钢材的时效处理	117
4.4.4 钢材的热处理	118
4.5 钢材的标准与选用	119
4.5.1 钢结构用钢	119
4.5.2 钢筋混凝土结构用钢	121
4.5.3 钢材的选用原则	124
4.6 钢材的腐蚀及防护	124
4.6.1 钢材的锈蚀	124
4.6.2 防止钢材锈蚀的措施	125
4.6.3 建筑钢材的防火	125
4.7 铝合金及其制品	125
4.7.1 铝及铝合金	125
4.7.2 铝合金制品	126
4.8 新型金属材料	126
4.8.1 超高强度钢	126
4.8.2 形状记忆合金	126
4.8.3 非磁性金属	126
4.8.4 非晶质金属	126
思考题	127

第5章 沥青及沥青混合料

5.1 沥青	128
5.1.1 沥青的分类与基本组成结构	128
5.1.2 石油沥青的主要技术性质	130
5.1.3 石油沥青的技术标准	135
5.1.4 石油沥青的选用	136
5.1.5 沥青改性	136
5.2 沥青混合料	137
5.2.1 沥青混合料的定义及分类	137
5.2.2 沥青混合料的组成结构	138
5.2.3 沥青混合料的技术性能和测试 方法	139
5.2.4 沥青混合料的组成材料	141
5.2.5 热拌沥青混合料配合比设计 方法	147
思考题	159

第6章 砌体材料

6.1 砌墙砖	160
6.1.1 烧结砖和烧结砌块	160
6.1.2 非烧结砖	165
6.2 常用建筑砌块	166
6.2.1 蒸压加气混凝土砌块 (代号 ACB)	166
6.2.2 蒸养粉煤灰砌块 (代号 FB)	167
6.2.3 普通混凝土小型空心砌块 (代号 NHB)	167
6.2.4 轻集料混凝土小型空心砌块	

(代号 LHB)	168
6.3 墙用板材	168
6.3.1 水泥类墙用板材	168
6.3.2 石膏类墙用板材	168
6.3.3 复合墙板	169
6.4 天然石材	169
6.4.1 岩石的形成和分类	170
6.4.2 建筑石材的技术性能	170
6.4.3 石材的加工类型及选用	172
思考题	172
第7章 合成高分子材料	173
7.1 合成高分子材料的基本知识	173
7.1.1 合成高分子材料的分子特征	173
7.1.2 合成高分子材料的性能特点	174
7.2 建筑塑料	175
7.2.1 建筑塑料的基本组成	175
7.2.2 建筑塑料的分类及主要性能	175
7.2.3 塑料型材及管材	176
7.3 胶黏剂	178
7.3.1 胶黏剂的基本要求	178
7.3.2 胶黏剂的基本组成材料	179
7.3.3 土木工程常用的胶黏剂性能特点 及应用	180
7.4 土工合成材料	180
7.4.1 土工合成材料的功能及主要 应用	181
7.4.2 土工合成材料的分类及产品	181
思考题	182
第8章 木材	183
8.1 木材的分类与构造	183
8.1.1 树木的分类	183
8.1.2 木材的构造	183
8.2 木材的性能	184
8.2.1 木材的含水率及吸湿性	184
8.2.2 木材的湿胀干缩与变形	184
8.2.3 木材的力学性质	185
8.3 木材及其制品的应用	187
8.3.1 条木地板	188
8.3.2 拼花木地板	188
8.3.3 复合木地板	188
8.3.4 胶合板	188
8.3.5 刨花板、木丝板、木屑板	188
8.4 木材的防护与防火	189
8.4.1 木材的腐朽与防腐	189

8.4.2 木材的防虫	189
8.4.3 木材的防火	189
思考题	189
第9章 建筑功能材料	190
9.1 建筑防水材料	190
9.1.1 防水材料的分类与组成	190
9.1.2 防水材料的性能与选用	190
9.2 保温隔热材料	193
9.2.1 常用无机保温隔热材料	193
9.2.2 常用有机保温隔热材料	194
9.2.3 保温隔热材料的新发展	194
9.3 吸声隔声材料	195
9.3.1 吸声和隔声材料的定义	195
9.3.2 常用吸声材料的种类	195
9.3.3 隔声材料	196
9.4 建筑涂料	196
9.4.1 内墙涂料	197
9.4.2 外墙涂料	197
9.5 建筑玻璃	197
9.5.1 玻璃的原料	197
9.5.2 建筑玻璃的成型工艺	198
9.5.3 建筑玻璃的品种与特性	198
9.6 建筑陶瓷	200
9.6.1 陶瓷的概念与分类	200
9.6.2 建筑陶瓷的品种与特性	201
9.7 饰面石材	201
9.7.1 天然饰面石材的加工方法	202
9.7.2 人造饰面石材	203
9.8 建筑功能材料的新发展	204
9.8.1 绿色建筑功能材料	204
9.8.2 复合多功能建材	204
9.8.3 智能化建材	204
思考题	205
附录 常用土木工程材料试验	206
试验一 材料基本物理性质试验	206
试验二 水泥试验	209
试验三 集料试验	215
试验四 砂浆试验	221
试验五 普通混凝土试验	223
试验六 钢筋试验	230
试验七 石油沥青试验	232
试验八 沥青混合料试验	237
参考文献	244

第 0 章 绪 论

0.1 土木工程材料的定义和分类

土木工程材料是人类建造活动所用一切材料的总称，它是房屋、道路、桥梁、水利等一切土木工程的物质基础，也称建筑材料。

土木工程材料品种繁多、性质各异，为了方便应用，工程中常按不同的方法对土木工程材料进行分类。

(1) 按材料的化学成分分类 将土木工程材料分为无机材料、有机材料和复合材料三大类，见表 0-1。

表 0-1 土木工程材料按组成分类

分 类			举 例
无机材料	金属材料	黑色金属	钢、铁、合金、不锈钢等
		有色金属	铅、铜、铝合金等
	非金属材料	天然石材	砂、石及石材制品
		烧土制品	砖、瓦、玻璃、陶瓷制品
		胶凝材料	水泥、石灰、石膏、水玻璃、菱苦土等
		混凝土及制品	混凝土、砂浆、硅酸盐制品等
		无机纤维材料	玻璃纤维、矿物棉等
有机材料	植物材料		木材、竹材、植物纤维及制品等
	沥青材料		天然沥青、石油沥青、沥青混合料
	合成高分子材料		塑料、合成橡胶、合成纤维、合成胶黏剂、合成树脂、涂料等
复合材料	金属-非金属材料		钢筋混凝土、钢纤维混凝土
	无机非金属-有机材料		玻璃纤维增强塑料、树脂混凝土、聚合物水泥混凝土、沥青混凝土
	金属-有机材料		PVC 钢板、金属夹芯板、塑钢等

(2) 按使用功能分类 通常分为承重结构材料、非承重结构材料及功能材料三大类。

① 承重结构材料：主要指梁、板、基础、墙体和其他受力构件所用的建筑材料。最常用的有钢材、混凝土、砖、砌块等。

② 非承重结构材料：主要包括框架结构的填充墙、内隔墙和其他围护材料等。

③ 功能材料：主要有防水材料、防火材料、装饰材料、绝热材料、吸声隔声材料等。

0.2 土木工程材料的发展趋势

土木工程材料的发展是随着人类社会生产力的不断发展而发展的。远古时期人类居住在洞穴中，石器时代人类挖土凿石，伐木搭棚。在距今三千多年的河南安阳的殷墟、西周早期

的陕西凤雏遗址,就发现了冶铜作坊、烧土瓦和三合土,说明我国劳动人民在三千多年前就己能烧制石灰、砖瓦等人造土木工程材料。公元前2世纪在欧洲己采用天然火山灰、石灰、碎石拌制石灰火山灰混凝土。历史上,我国曾兴建了大量世界闻名的土木工程,如都江堰、长城、大运河、赵州桥、应县佛宫寺木塔、北京故宫等。与此同时,在国外也有一些著名的土木工程,如古罗马万神庙、古罗马斗兽场、古埃及金字塔等。但古代国内外这些工程基本上以土、石、砖、木、三合土、石灰火山灰混凝土为土木工程材料。19世纪20年代波特兰水泥的发明,为用作混凝土的胶凝材料有了质的飞跃,产生了水泥混凝土。19世纪中期以后,钢铁工业得到了发展,在混凝土中配入钢筋,形成钢筋混凝土复合材料,弥补了纯混凝土抗拉强度不足的缺陷,大大促进了混凝土在各种工程结构上的应用,这是土木工程材料的巨大进步。20世纪20年代预应力混凝土的出现,使大跨度建筑、高层建筑、抗震、防裂的建筑成为可能,这是土木工程材料史上的再一次飞跃,促进了世界范围内建筑结构和建筑艺术的迅速发展。20世纪80年代,水泥高效减水剂的研制和使用,是混凝土技术向高强高性能混凝土技术发展的转折点。水泥、混凝土、钢筋混凝土、预应力混凝土仍然是现代建筑的主要结构材料。

近年来,随着人民生活水平的提高,对居住环境提出更多、更高的要求。因此,具有防水、保温隔热、吸声、耐火等功能的土木工程材料应运而生,玻璃、塑料、铝合金、塑钢等新型复合材料更是层出不穷,促进了土木工程材料生产及其科学技术的迅速发展。

土木工程材料的大量生产,不仅消耗了大量的自然资源,而且还要消耗大量的能源,并产生废气、废渣,对环境构成了严重污染。所以,研制和开发高性能土木工程材料和绿色土木工程材料已成为21世纪土木工程材料工业的发展方向,轻质、高强、高耐久、优异装饰性和多功能的材料将不断出现。

0.3 土木工程材料的重要性和标准化

土木工程材料是一切土木工程的重要物质基础,是国民经济的支柱之一,与人们生活息息相关,不可分割。在任何一项土木工程中,用于土木工程材料的投资都占有很大的比重,一般占工程总造价的50%以上。同时,土木工程材料与建筑、结构、施工存在着相互促进、相互依赖的密切关系。建筑工程中许多技术问题的解决,往往依赖于土木工程材料问题的突破。一种新型土木工程材料的出现,必将促进建筑形式的再创新、结构设计和施工方法的改进。此外,正确使用土木工程材料是保证工程质量的关键。土木工程材料选择不当、质量不符合要求,建筑物的正常使用和耐久性就得不到保障。所以,土木工程材料的品种、质量与规格,直接影响着工程结构形式和施工方法,决定着工程的安全性、适用性、耐久性、经济性。

土木工程材料现代化生产的科学管理,必须对材料产品的各项技术制定统一的执行标准。这些标准一般包括:产品规格、分类、技术要求、检验方法、验收规则、标志、运输和储存等方面内容。

土木工程材料的标准,是企业生产的产品质量是否合格的技术依据,也是供需双方对产品质量进行验收的依据。通过产品标准化,就能按标准合理地选用材料,从而使设计、施工也相应标准化,同时可加快施工进度,降低造价。

世界各国均有自己的国家标准,如美国的“ASTM”标准、德国的“DIN”、英国的“BS”、日本的“JIS”以及世界范围统一使用的国际标准“ISO”。

目前我国常用的标准有如下四大类。

(1) 国家标准 国家标准有强制性标准(代号 GB)和推荐性标准(代号 GB/T)。

(2) 行业标准 建设部行业标准(代号 JGJ);国家建材局标准(代号 JC);交通部标准(代号 JT);水利部标准(代号 SL);电力行业标准(代号 DL)。

(3) 地方标准 地方标准代号 DB。

(4) 企业标准 企业标准代号 QB。

技术标准的表示方法由标准名称、代号、标准编号和批准年份等组成。例如国家标准(强制性),《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2007);建设部行业标准(推荐性),《建筑砂浆基本性能试验方法标准》(JGJ/T 70—2009)。

0.4 土木工程材料课程的教学目的与学习方法

土木工程材料课程是一门土木建筑类各专业本科生的专业基础课,为学生学习后继专业课程提供必要的基础知识,使学生毕业后在设计、施工、监理、检测等工作中能够合理选用土木工程材料,为其今后从事土木工程结构与材料等方向的科学研究准备必要的基础知识。

土木工程材料种类繁多,涉及面广,内容庞杂,且各类自成体系。学习时应该以材料组成、结构、性能与应用为学习主线,重点掌握材料的性能与应用,通过材料的组成和结构特点来理解材料的性能、应用及发展趋势;再通过不同材料的横向比较,理解各自的特点和使用范围。具体学习方法是上课注意听讲,正确理解课内的知识点;下课认真做每章后面的思考题,巩固和掌握所学的知识点。试验课是本课程的重要教学环节,通过试验操作及对试验结果分析,不但可加深了解材料的性能和掌握试验方法,而且可培养科学研究能力以及严谨、求实的工作作风。

第1章 土木工程材料的基本性质

【本章提要】 土木工程材料的基本性质包括材料的组成及结构、基本物理性质、基本力学性质、耐久性等。土木工程材料遭受不同的作用,就需要具备不同的性质。本章的学习目标是熟悉和掌握各种材料的基本性质,在工程设计与施工中正确选择和合理使用各种材料。

1.1 材料的组成和结构

材料的组成、结构和构造是决定材料性质的内在因素。要了解材料的性质,必须先了解材料的组成、结构与材料性质之间的关系。

1.1.1 材料的组成

材料的组成是指材料的化学成分或矿物组成。它不仅影响着材料的化学性质,而且也是决定材料物理力学性能的重要因素。

1.1.1.1 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与数量。当材料处于某一环境中,材料与环境中的物质间必然要按化学变化规律发生作用。如混凝土受到酸、盐类物质的侵蚀作用;木材遇到火焰时的耐燃、耐火性能;钢材和其他金属材料的锈蚀等都属于化学作用。材料在各种化学作用下表现出的性质都是由其化学组成所决定的。

1.1.1.2 矿物组成

矿物组成是指构成材料的矿物的种类和数量。这里的矿物是指无机非金属材料中具有特定的晶体结构、特定的物理力学性能的组织结构。某些材料如天然石材、无机胶凝材料,其矿物组成是决定其性质的主要因素。例如,硅酸盐水泥中,熟料矿物硅酸三钙含量高,则其硬化速度较快,强度较高。

1.1.1.3 相组成

将材料中结构相近、性质相同的均匀部分称为相。自然界中的物质可分为气相、液相、固相三种形态。土木工程材料大多数为多相材料。例如,水泥混凝土是由集料颗粒(集料相)分散在水泥浆基体(基相)中所组成的多相材料。多相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,界面往往是一个较薄区域,它的成分和结构与相内的部分是不一样的,具有界面特性形成“界面相”。因此,对于土木工程材料,可通过改变和控制其组成和界面特性,来改善和提高材料的技术性能。

1.1.2 材料的结构

材料的结构分为宏观结构、细观结构和微观结构,它是决定材料性质的重要因素之一。

1.1.2.1 宏观结构

材料的宏观结构是指可用肉眼能观察到的外部和内部的结构,其尺寸在 10^{-3}m 级以上。土木工程材料常见的结构形式有:致密结构、纤维结构、多孔结构、层状结构、散粒结构、纹理结构。

(1) 致密结构 致密结构的材料内部基本上无孔隙, 结构致密。这类材料的特点是强度和硬度较高, 吸水性小, 抗渗和抗冻性较好, 耐磨性较好, 绝热性差, 如钢材、天然石材、玻璃钢等。

(2) 纤维结构 所谓纤维, 一般指其长度和直径相比大得多而直径很细小的材料。一般其直径为 $1\mu\text{m}$ 到几微米, 而长度为 1mm 到 1km 。纤维的粗细叫纤度, 量测单位 D (登尼尔), 长 9km 而重 1g 的纤维叫 1D 或 1 支。根据纤维的组成, 可分为无机纤维和有机纤维; 根据成因, 可分为天然纤维和人造纤维。单纤维的抗拉强度比同一物质的其他形状材料的要大得多, 如金属和陶瓷的晶须为针状结晶, 可具有超高抗拉强度。玻璃是脆性材料, 抗弯强度很小, 但玻璃纤维却具有很大的柔性, 可以产生很大的弯曲变形。纤维的伸长率、弹性模量、吸湿性等, 依不同组成的材料有很大的不同, 如无机纤维比有机纤维的弹性模量大, 有细胞组织的动植物纤维和尼龙纤维的吸湿性大等等。

组合纤维结构材料如岩棉、矿棉、玻璃棉等, 由于含大量空气, 在干燥状态下质轻, 隔热性和吸音性强。

(3) 多孔结构 材料中含有几乎均匀分布的几微米到几毫米的独立孔或连续孔的结构称为多孔结构。广义地讲, 具有较密实结构的砂浆、混凝土、黏土砖也是多孔结构, 但此处特指天然或由人工发泡方法制成的含多量气泡的结构。可以按孔的形态、成因、孔壁性质来分类, 常用的是按气孔形态分类 (图 1-1)。

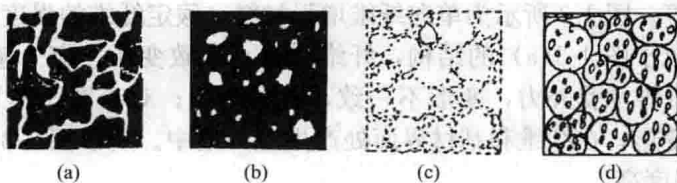


图 1-1 多孔结构的不同类型

图 1-1(a) 为连续开放气孔的多孔结构, 如木材; 图 1-1(b) 为独立封闭气孔的多孔结构, 这一类的结构极少, 有的焙烧质量较好的陶粒内部可有此类孔; 图 1-1(c) 为不完全封闭的独立气孔结构, 如加气混凝土、泡沫混凝土, 实际上是由大孔 (气孔) 和微孔 (毛细孔以下) 组成; 图 1-1(d) 为独立气孔块的组合多孔结构, 如陶粒混凝土中的陶粒为独立气孔块, 而由陶粒组成的陶粒混凝土就成为此类结构。

(4) 复合结构 由两种或两种以上不同结构的材料或不同组成的材料机械地组合在一起, 发挥各自的优点而共同工作的材料即具有复合的结构。例如混凝土材料具有较高抗压强度, 但抗拉强度很低, 与钢筋组成钢筋混凝土构件后就可以使混凝土受压、钢筋承受拉而共同工作, 这就是一种复合材料; 又如用聚乙烯等高分子材料和硫酸钙或碳酸钙等无机盐混炼后成为人造木材, 也是一种复合结构。复合结构的特点是, 复合后各组分仍具有各自的化学性质和结构, 但由于互相取长补短共同工作而组成整体, 就具有新的物理力学特性。复合结构依复合方法的不同主要分为分散复合结构和层压复合结构。

① 分散复合结构。粒状、块状、纤维状等分散材料均匀分布在具有胶结能力的基材中的结构, 为分散复合结构。如砂、石分散在水泥浆体中组成混凝土; 纤维增强塑料由纤维均匀分布在树脂中。图 1-2 所示为几种典型的分散复合材料。

② 层压复合结构。用黏接或其他的方法把层状结构的材料积压在一起成为整体。可以有同种材料层压, 如胶合板; 异种材料交替层压, 如玻璃钢。还可以将一种材料埋入另一种

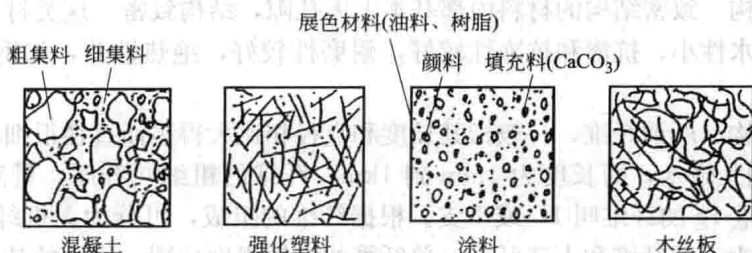


图 1-2 几种典型的分散复合结构

材料内,称为埋入层压,如珐琅、钢筋混凝土、镀膜材料等。层压结构可以得到均质的材料,并对材料进行改性。如用玻璃纤维制成玻璃纤维布,和环氧树脂交替层压后制成玻璃钢,就具有很好的耐热性和很高的机械强度,并有较高的抗冲击韧性。胶合板是将木材的边材和心材按木纹相垂直的方向交替层压制成,大大减少了因不同部位变形性质不同而造成的材料体积变化的方向性。将强度很低的纸做成蜂窝夹层板,就具有相当大的刚度和抗压强度,珐琅制品使金属变成耐腐蚀的材料等等。图 1-3 所示为单向纤维增强材料,假定纤维的强度和弹性模量比基材的大,当受力时,对于图 1-3(a) 的结构,纤维和基材一致变形,应力超过基材的强度时,应力重新分配,由纤维承受外力,变形不一致,直到断裂;对于图 1-3(b) 结构,受力时,纤维和基材不一致变形,在纤维和基材界面处产生应力集中。所以图 1-3(a) 结构的强度比图 1-3(b) 结构的强度高。

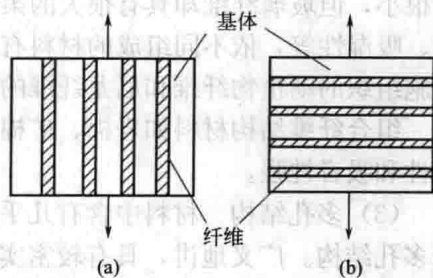


图 1-3 纤维方向不同的力学性质变化

同样,组成的材料其结构不同时,可具有不同的物理力学性质。从宏观结构来看,如玻璃和玻璃纤维,碳和碳纤维,都在强度和韧性上有显著的差别;从亚微观尺度来看,孔结构不同的混凝土材料会具有不同的强度和渗透性、抗冻性等物理性质;从微观结构来看,同样由碳元素组成而具有不同微观结构的金刚石和石墨就具有截然不同的性质。

1.1.2.2 细观结构(亚微观结构)

细观结构是指用光学显微镜所能观察到的结构,是介于宏观和微观之间的结构,其尺度范围在 $10^{-6} \sim 10^{-3} \text{m}$,主要用于研究材料内部的晶粒、颗粒的大小和形态、晶界与界面、孔隙与微裂纹等。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,混凝土可分为基相、集料相、界面相;天然岩石可分为矿物、晶体颗粒、非晶体组成;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的各种组织结构各异,其特征、数量、分布和界面性质对材料性能有重要影响。

1.1.2.3 微观结构

材料的微观结构是指用电子显微镜、扫描电子显微镜或 X 射线来分析研究材料的原子、分子层次的结构特征,其尺寸范围在 $10^{-10} \sim 10^{-6} \text{m}$ 。材料的微观结构决定材料的许多物理性质、力学性质,如材料的强度、硬度、弹塑性、熔点、导电性、导热性等。

按材料组成质点的空间排列或联结方式,材料微观结构可分为晶体和非晶体。

(1) 晶体 在空间上,质点(原子、离子、分子)按一定的规则在空间呈有规律排列的固体称为晶体。晶体具有一定的几何外形和固定的熔点和化学稳定性。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。中性原子以共价键结合而形成的晶体,如金刚石。
- ② 离子晶体。正负离子以离子键结合而形成的晶体,如 NaCl。
- 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、层状结构材料滑石等。
- 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。

从键的结合力来看,共价键和离子键最强,金属键较强,分子键最弱。例如,木材(由木质素纤维组成),在木质素纤维内部链状方向上的共价键($-C-C-$)力要比纤维与纤维之间的分子键结合力大得多,所以木材强度具有方向性;石墨(化学元素是碳)是层状结构材料,同一层是共价键结合,层与层之间是分子键结合,所以石墨易被剥离成薄片;金刚石(化学元素也是碳)是以共价键结合的立体空间网架结构材料,因此,金刚石质地坚硬,强度高。

(2) 非晶体

① 玻璃态。材料中的质点呈不规则形状排列,没有固定的熔点,没有固定的几何形状,破坏时无解理,具有较大的硬度。玻璃体的形成,主要是由于熔融物质急剧冷却达到凝固点时具有很大的黏度,来不及形成晶体结构就凝成固体。玻璃体是化学不稳定的结构,具有较大的内能,在一定的条件下可以具有一定的化学活性。例如玻璃状火山灰、粒化高炉矿渣、粉煤灰等。

② 无定形态。例如铝硅酸盐的黏土质矿物在分解温度(如高岭石在 600°C)下分解成无定形的 SiO_2 和 Al_2O_3 。这时并未熔融,故生成物为密度较小的固体,不同于熔融态骤冷所形成的致密的玻璃体。

③ 凝胶。由粒径为 $0.1\sim 1\mu\text{m}$ 大小的固体粒子组成的分散体系称为胶体。液态胶体称为溶胶,固态的胶体称为凝胶。凝胶中含有数量不定的凝胶水,属于凝胶的一部分。因此凝胶既具有刚性,而在长期应力的作用下又有类似黏性流动的性质而产生较大的塑性变形。胶体粒子可能是无定形结构,也可能是具有胶体粒子大小而发育不完全的微晶。微晶组成的凝胶可以在高倍电子显微镜下看见其形貌,并在 X-射线衍射时出现宽而低的峰。但它不是晶体,不具备典型的晶体的特性。

因此,固体的晶态和非晶态并没有严格的界限。非晶体结构的材料可以由一些微晶或隐晶粒子组成近程有序、远程无序的结构。

1.2 材料的基本物理性质

1.2.1 密度、表观密度、体积密度和堆积密度

1.2.1.1 密度

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:

$$\rho = m/V \quad (1-1)$$

式中 ρ ——材料的密度, g/cm^3 ;

m ——材料的质量(干燥至恒重), g ;

V ——材料在绝对密实状态下的体积, cm^3 。

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。在测定有孔隙材料

(如砖、石等)的密度时,应把材料磨成粒径小于 0.20mm 的细粉,干燥后,用李氏瓶测定其绝对密实体积。材料磨得越细,测得的密实体积数值就越精确。

另外,工程上还经常用到相对密度,是指材料的密度与 4℃ 纯水密度之比。

1.2.1.2 表观密度

表观密度是指单位体积(含材料实体及闭口孔隙体积)材料的干质量,也称视密度。按式(1-2)计算:

$$\rho_0 = m/V_0 \quad (1-2)$$

式中 ρ_0 ——材料的表观密度, kg/m³ 或 g/cm³;

m ——材料的质量, kg 或 g;

V_0 ——材料在包含闭口孔隙条件下的体积, m³ 或 cm³, 采用排液置换法或水中称重法测量。

1.2.1.3 体积密度

体积密度是指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,俗称容重。体积密度可按式(1-3)计算:

$$\rho' = m/V' \quad (1-3)$$

式中 ρ' ——材料的体积密度, kg/m³ 或 g/cm³;

m ——材料的质量,按有关标准规定,该质量是指自然状态下的气干质量,即将试件置于通风良好的室内存放 7d 后测得的质量, kg 或 g;

V' ——材料在自然状态下的体积,包括材料实体及内部孔隙(开口孔隙和闭口孔隙), m³ 或 cm³。

对于规则形状材料的体积,可用量具测得。例如,加气混凝土砌块的体积是逐块量取

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,可用排液法或封蜡排液法测得。

块状物质的固体体积 V 、表观体积 V_0 和自然体积 V' 的关系如图 1-4 所示。

1.2.1.4 堆积密度

堆积密度的指散粒状材料在自然堆积状态下单位堆积体积的质量,有干堆积密度及湿堆积密

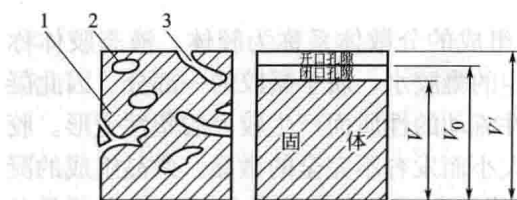


图 1-4 材料孔隙特征

1—固体; 2—闭口孔隙; 3—开口孔隙

度之分。堆积密度可按式(1-4)计算:

$$\rho_1 = m/V_1 \quad (1-4)$$

式中 ρ_1 ——材料的堆积密度, kg/m³;

m ——材料的质量, kg;

V_1 ——材料的堆积体积, m³。

测定散粒材料的堆积密度时,材料的质量是指填充在一定容器内的材料质量,其堆积体积是指所用容器的体积。因此,材料的堆积体积包括材料绝对体积,内部所有孔体积和颗粒间的间隙体积。同一种材料堆积状态不同,堆积体积大小也不一样,松散堆积下的体积较大,密实堆积状态下的体积较小。按自然堆积体积计算的密度为松堆密度,以振实体积计算的则为紧堆密度。

对于同一种材料,由于材料内部存在孔隙和空隙,故一般密度>表观密度>体积密度>堆积密度。

常用建筑材料的密度、表观密度和堆积密度如表 1-1 所示。

表 1-1 常用建筑材料的密度、表观密度与堆积密度

材 料	密度/(g/cm ³)	表观密度/(kg/m ³)	堆积密度/(kg/m ³)
石灰石	2.60	1800~2600	—
花岗岩	2.60~2.80	2500~2700	—
碎石(石灰岩)	2.60	—	1400~1700
砂	2.60	—	1450~1650
黏土	2.60	—	1600~1800
普通黏土砖	2.50~2.80	1600~1800	—
水泥	3.10	—	1200~1300
普通混凝土	—	2100~2600	—
钢材	7.85	7850	—
木材	1.55	400~800	—
泡沫塑料	—	20~50	—

1.2.2 材料的孔隙率和空隙率

1.2.2.1 孔隙率与密实度

材料的孔隙率是指材料中的孔隙体积占材料自然状态下总体积的百分率,它以 P 表示。孔隙率按式(1-5) 计算:

$$P = \frac{V' - V}{V'} \times 100\% = \left(1 - \frac{\rho'}{\rho}\right) \times 100\% \quad (1-5)$$

密实度是与孔隙率相对应的概念,指材料体积内被固体物质充实的程度,用符号 D 表示,按式(1-6) 计算:

$$D = \frac{V}{V'} \times 100\% = \frac{\rho'}{\rho} \times 100\% \quad (1-6)$$

即

$$P + D = 1$$

孔隙率的大小直接反映了材料的致密程度,除孔隙率外,孔隙特征、孔径大小对材料的性能具有重要的影响作用。

材料的孔隙特征多种多样,如大小、形状、分布、连通性等。一般情况下,孔隙率大的材料宜选择作为保温隔热材料和吸声材料,同时还要考虑材料开口与闭口状态。开口孔隙是指材料内部孔隙不仅彼此互相贯通,并且与外界相连。开口孔隙除对吸声有利外,对材料强度、抗渗、抗冻和耐久性均不利。闭口孔隙是指材料内部孔隙彼此不通,而且与外界隔绝。微小而均匀的闭口孔隙可降低材料热导率,使材料具有轻质绝热性能,并可提高材料抗渗、抗冻和耐久性。由此可见,材料的孔隙率也可分为开口孔隙率 P_k 和闭口孔隙率 P_b ,即

$$P_k = \frac{V_k}{V'} \times 100\% \quad (1-7)$$

$$P_b = P - P_k \quad (1-8)$$

式中 V_k ——指开口孔的体积。

按照孔径大小将混凝土材料内部的孔隙分为气孔、毛细孔和凝胶孔三种。气孔是混凝土搅拌时引入的或人为引入的气泡而形成的孔,平均孔径达 $50 \sim 200 \mu\text{m}$ (也称大孔),最大甚至达到 1mm 以上,对材料的强度和抗渗性能有显著影响;毛细孔是硬化水泥浆体内没有被

固相填充的空间,低水灰比浆体中毛细孔孔径在 $2\sim 50\text{nm}$,而高水灰比浆体中可达 $3\sim 5\mu\text{m}$,毛细孔对于材料的吸水性、干缩性和抗冻性影响较大;凝胶孔是水泥水化产物C—S—H凝胶的层间孔,孔径范围为 2nm 以下,对材料的性能几乎没有任何影响。

1.2.2.2 材料的空隙率与填充率

材料空隙率是指散粒状材料在堆积体积状态下颗粒间空隙体积占堆积体积的百分率,它以符号 P' 表示。空隙率可按式(1-9)计算:

$$P' = \frac{V_1 - V_0}{V_1} \times 100\% = \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_0}\right) \times 100\% \quad (1-9)$$

材料填充率是指在某种堆积体积中,被散粒状材料所填充的程度,用符号 D' 表示,按式(1-10)计算:

$$D' = \frac{V_0}{V_1} \times 100\% = \frac{\rho_1}{\rho_0} \times 100\% \quad (1-10)$$

空隙率的大小反映了散粒材料的颗粒之间互相填充的程度。在配制混凝土、砂浆时,空隙率可作为控制集料的级配、计算配合比的依据,其基本思路是粗集料空隙被细集料填充,细集料的空隙被胶凝材料和水组成的浆体填充。

1.2.3 材料与水有关的性质

1.2.3.1 亲水性与憎水性

水与不同固体材料表面之间相互作用的情况是不同的。当水与材料接触时,在材料、水和空气三相交点处,沿水表面的切线与水和固体接触面所成的夹角 θ 称为润湿角(图1-5)。 θ 越小,浸润性越好。当润湿角 $\theta \leq 90^\circ$ 时,水分子之间的内聚力小于水分子与材料分子间的相互吸引力,这种性质称为材料亲水性。具有这种性质的材料称为亲水性材料[图1-5(a)]。当润湿角 $\theta > 90^\circ$ 时,水分子之间的内聚力大于水分子与材料分子间的吸引力,则材料表面不会被水浸润,这种性质称为材料的憎水性。具有这种性质的材料称为憎水性材料[图1-5(b)]。建筑材料中水泥制品、玻璃、陶瓷、金属材料、石材等无机材料和部分木材等为亲水性材料;沥青、塑料、油漆、防水油膏等为憎水性材料。

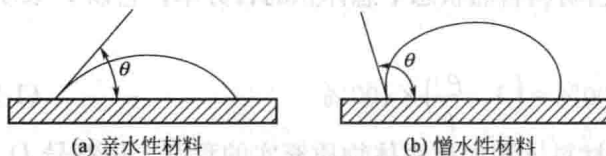


图 1-5 材料的润湿边角

当润湿角 $\theta \leq 90^\circ$ 时,水分子之间的内聚力小于水分子与材料分子间的相互吸引力,这种性质称为材料亲水性。具有这种性质的材料称为亲水性材料[图1-5(a)]。当润湿角 $\theta > 90^\circ$ 时,水分子之间的内聚力大于水分子与材料分子间的吸引力,则材料表面不会被水浸润,这种性质称为材料的憎水性。具有这种性质的材料称为憎水性材料[图1-5(b)]。建筑材料中水泥制品、玻璃、陶瓷、金属材料、石材等无机材料和部分木材等为亲水性材料;沥青、塑料、油漆、防水油膏等为憎水性材料。

1.2.3.2 材料的吸水性与吸湿性

(1) 吸水性 材料的吸水性是指材料在水中吸收水分的性质。材料吸水饱和时的含水率称为材料的吸水率,吸水率有质量吸水率和体积吸水率两种表示方法。

① 质量吸水率。质量吸水率是指材料吸水饱和时,所吸收水分的质量占干燥材料质量的百分比,用式(1-11)表示:

$$W_m = \frac{m_b - m_g}{m_g} \times 100\% \quad (1-11)$$

式中 W_m ——质量吸水率, %;

m_g ——材料在干燥状态下的质量, g;

m_b ——材料在吸水饱和状态下的质量, g。

② 体积吸水率。体积吸水率是指材料吸水饱和时,所吸水分的体积占干燥材料体积的百分比,用式(1-12)表示: