



高等学校土建类专业“十二五”规划教材

土木工程材料

吕丽华 主 编 李振国 李军卫 副主编 柳俊哲 主 审

TUMU

GONGCHENG
CAILIAO



化学工业出版社

高等学校土建类专业“十二五”规划教材

土木工程材料

	吕丽华	主 编
李振国	李军卫	副主编
	柳俊哲	主 审



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书是为高等学校开设的土木工程专业学生学习土木工程材料专业基础课而编写的。主要介绍土木工程材料的基本组成、技术性质、应用方法和试验等。所涉及的基本材料包括天然石料、石膏、石灰、菱苦土、水玻璃、水泥、混凝土与砂浆、砌筑材料、钢材、沥青与沥青混合料、合成高分子材料、装饰、隔热与吸声材料等。

本书主要适用于高等学校、成人高校土木工程专业的教学，也可以作为土木工程类相关专业和继续教育的培训教材。对从事土木工程事业的技术人员也是非常好的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

土木工程材料/吕丽华主编. —北京: 化学工业出版社,
2013. 1

高等学校土建类专业“十二五”规划教材

ISBN 978-7-122-15822-2

I. ①土… II. ①吕… 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 300561 号

责任编辑: 陶艳玲

文字编辑: 刘莉珏

责任校对: 王素芹

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 刷: 北京市振南印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 20 字数 508 千字 2013 年 3 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: 39.00 元

版权所有 违者必究

编委会名单

主 编：吕丽华

副主编：李振国 李军卫

主 审：柳俊哲

编 委：吕丽华 李军卫 李振国 白广明

刘佳生 左红军 吴 建

前 言

此教材的编写主要以教育部对土木工程专业学生的培养要求为依据，同时参考了多种版本的《道路建筑材料》、《土木工程材料》、《建筑材料》教材、相关专业书籍、最新工程材料的标准与规范和国内外成熟的研究成果。本书主要包括常用材料、基本理论、试验方法以及工程中出现的新材料，目的是让学生了解工程材料发展历史，掌握工程材料应用现状，明白工程材料发展方向。每章之后均附有思考与练习，以方便学生复习和自学。在内容阐述过程中，力求条理清晰、概念准确、层次分明，并努力做到理论联系实际。

本教材主要针对建筑工程专业和道路与桥梁专业学生编写，着重引导学生培养分析能力和动手能力，也是从事土木工程建设相关人员与实施“卓越工程师计划”的土木工程学院学生了解工程材料的参考书。

教材的编写分工为：绪论、第七章由东北林业大学吕丽华编写；第五章、第六章、第十章及第十一章由哈尔滨理工大学李振国编写；第二章、第九章、第四章第一节至第五节由黑龙江东方学院李军卫编写；第四章第六节至第十二节、附录试验四、附录试验五、附录试验六、附录试验七由黑龙江省水利科学研究院白广明编写；第一章、第三章由哈尔滨商业大学刘佳生编写；第八章、附录试验二、附录试验三由东北林业大学左红军编写；附录试验一、附录试验八、附录试验九由东北林业大学吴建编写。

本书由宁波大学柳俊哲主审。

参加本书编写人员均具有多年教学、科研与工程实践经验，但由于编者水平有限，加之时间仓促，书中不妥之处在所难免，恳请读者给予批评指正。

编 者

2012 年 11 月

目 录

绪论	1	二、常用石料制品	29
一、土木工程材料的分类	1	思考与练习	30
二、土木工程材料的技术标准分类	1	第三章 无机胶凝材料	31
三、土木工程材料的发展趋势	2	第一节 气硬性胶凝材料	31
四、《土木工程材料》的学习方法	3	一、石膏	31
第一章 土木工程材料的基本性质	5	二、石灰	34
第一节 材料的组成、结构与构造	5	三、水玻璃	38
一、材料的组成	5	思考与练习	40
二、材料的结构	6	第二节 水硬性胶凝材料	40
三、材料的构造	8	一、硅酸盐水泥	41
思考与练习	8	二、掺混合料的硅酸盐水泥	50
第二节 材料的物理性质	8	三、其他种类的水泥	55
一、材料与质量有关的性质	8	思考与练习	59
二、材料与水有关的性质	10	第四章 水泥混凝土和砂浆	60
三、材料的热工性质	13	第一节 概述	60
思考与练习	14	一、混凝土的发展史	60
第三节 材料的力学性质	14	二、混凝土的分类	60
一、材料的强度及强度等级	14	三、混凝土的性能特点	60
二、材料的弹性与塑性	16	第二节 混凝土的组成材料	61
三、材料的脆性与韧性	17	一、水泥	61
四、材料的硬度与耐磨性	17	二、骨料	61
思考与练习	17	三、拌合与养护用水	68
第四节 材料的耐久性	18	四、外加剂	68
思考与练习	18	五、矿物掺合料	73
第五节 材料的其他性质	18	第三节 新拌混凝土性能	76
一、材料的装饰性	18	一、和易性的概念	76
二、材料的防火性	19	二、和易性测定方法及指标	77
三、材料的放射性	20	三、影响和易性的主要因素	78
四、材料的吸声性	20	四、改善混凝土和易性的措施	79
五、材料的隔声性	21	五、拌合物浇筑后的性能	79
思考与练习	22	第四节 混凝土的力学性能	81
第二章 石料	23	一、混凝土的受压破坏机理	81
第一节 岩石的组成与分类	23	二、混凝土的力学性能	81
一、常见的主要造岩矿物	23	第五节 混凝土的变形	86
二、岩石的分类	24	一、化学收缩	86
第二节 岩石的力学性能及测试方法	26	二、温度变形	86
一、岩石的结构与构造	26	三、干湿变形	86
二、岩石的主要技术性质与要求	27	四、在荷载作用下的变形	87
第三节 常用石料品种	29	第六节 混凝土耐久性	88
一、常用天然石料	29	一、混凝土的抗渗性	89

二、混凝土的抗冻性	90	一、水泥类墙板	131
三、碳化	91	二、石膏类墙板	131
四、钢筋锈蚀	92	三、植物纤维墙板	132
五、混凝土的抗侵蚀性	92	四、复合墙板	132
六、碱-集料反应	92	思考与练习	132
七、提高混凝土耐久性的主要措施与 要求	93	第六章 建筑金属材料	133
第七节 混凝土的质量控制与强度评定	94	第一节 钢材的冶炼与分类	133
一、混凝土强度的质量控制	94	一、钢的冶炼	133
二、混凝土强度的评定	96	二、钢的分类	133
第八节 普通混凝土配合比设计	98	第二节 建筑钢材的主要技术性能	135
一、混凝土配合比的设计原则	98	一、抗拉性能	135
二、混凝土配合比设计步骤	98	二、冲击韧性	137
三、普通混凝土配合比设计的实例	104	三、耐疲劳性	138
第九节 泵送混凝土	105	四、冷弯性能	138
一、泵送混凝土定义及特点	105	五、焊接性能	139
二、泵送混凝土的可泵性	105	六、硬度	139
三、坍落度损失	106	第三节 钢材的组成结构及对性能的 影响	139
四、泵送混凝土对原材料的要求	106	一、钢材的晶体结构及基本晶体组织	139
五、泵送混凝土配合比设计基本原则	107	二、钢材的成分对性能的影响	140
第十节 高性能混凝土简述	108	第四节 钢材的强化与加工	140
一、概述	108	一、钢材冷加工强化	140
二、高性能混凝土的组成和结构	108	二、钢材的时效处理	141
三、高性能混凝土的原材料	110	三、钢材的热处理	142
四、实例	110	第五节 建筑钢材的技术标准及选用	142
第十一节 纤维混凝土	110	一、建筑钢材的主要品种	142
一、概述	110	二、钢筋混凝土结构用钢	145
二、纤维分类	110	第六节 建筑钢材的防锈与防火	148
三、纤维混凝土的特点	111	一、钢材锈蚀作用的机理	148
四、钢纤维混凝土	111	二、钢材的防锈蚀措施	149
第十二节 建筑砂浆	113	三、钢材的防火措施	149
一、砌筑砂浆	113	思考与练习	149
二、抹面砂浆	118	第七章 沥青	151
三、特种砂浆	120	第一节 石油沥青	151
思考与练习	120	一、沥青的概述	151
第五章 墙体材料	122	二、石油沥青的品种、组成与结构	151
第一节 砌墙砖	122	三、石油沥青的技术性质	155
一、烧结普通砖	122	四、石油沥青的技术标准	163
二、烧结多孔砖	126	五、石油沥青的改性	164
三、烧结空心砖	127	第二节 乳化沥青	167
四、非烧结砖	127	一、乳化沥青与乳化剂	167
第二节 砌块	128	二、乳化沥青的乳化机理	168
一、砌块的定义与分类	128	三、乳化沥青的技术标准	169
二、砌块的性能与应用	128	第三节 煤沥青	170
第三节 墙用板材	131	一、煤沥青的定义	170

二、煤沥青的化学组成	170	一、绝热材料的性能要求	212
三、煤沥青的技术性质与技术标准	171	二、建筑上常用的保温隔热材料	213
思考与练习	172	第二节 吸声隔声材料	215
第八章 沥青混合料	173	一、吸声材料	215
第一节 概述	173	二、建筑上常用吸声材料	217
一、定义	173	三、隔声材料	217
二、沥青混合料的分类	173	思考与练习	218
三、沥青混合料的优缺点	174	第十一章 建筑装饰材料	219
第二节 沥青混合料的组成材料	175	第一节 建筑玻璃	219
一、沥青	175	一、普通平板玻璃	219
二、粗集料	175	二、安全玻璃	220
三、细集料	176	三、节能玻璃	220
四、填料	176	四、装饰玻璃	221
第三节 沥青混合料的结构与强度理论	178	五、玻璃制品	221
一、沥青混合料的结构	178	第二节 建筑陶瓷	221
二、沥青混合料的强度理论	179	一、陶瓷制品的分类	221
第四节 沥青混合料的技术性质和技术要求	183	二、建筑陶瓷砖的分类	222
一、沥青混合料的技术性质	183	三、釉面内墙砖	222
二、热拌沥青混合料的技术指标	185	第三节 建筑涂料	223
第五节 沥青混合料的配合比设计	187	一、外墙涂料	224
一、目标配合比设计阶段	187	二、内墙涂料	224
二、生产配合比设计阶段	194	第四节 建筑装饰用饰面石材	225
三、生产配合比验证阶段	194	一、大理石建筑板材	225
思考与练习	194	二、花岗石建筑板材	225
第九章 合成高分子材料	195	第五节 木材及其制品	225
第一节 高分子材料的基本知识	195	一、木材的构造	226
一、高分子材料的分类	195	二、木材的性能	226
二、高分子材料的合成方法及命名	196	三、木材的优缺点	228
三、高分子材料的基本性质	196	四、木制品及其应用	228
第二节 常用建筑高分子材料	197	五、木材的干燥与防腐	230
一、树脂和塑料	197	第六节 建筑装饰材料的选用原则及发展方向	231
二、橡胶	199	思考与练习	232
三、高聚物合金	200	附录 土木工程材料试验	233
第三节 高分子材料在土木工程中的应用	201	试验一 材料基本性质试验	233
一、高分子防水材料	201	试验二 石料试验	236
二、涂料	202	试验三 石灰试验	242
三、建筑胶	206	试验四 水泥试验	246
四、高分子改性水泥混凝土	207	试验五 混凝土用集料试验	260
五、高分子改性沥青	210	试验六 普通混凝土试验	272
思考与练习	211	试验七 钢筋试验	287
第十章 绝热材料与吸声隔声材料	212	试验八 沥青材料试验	289
第一节 绝热材料	212	试验九 沥青混合料试验	299
		参考文献	310

绪 论

一、土木工程材料的分类

土木工程材料是指土木工程结构物所用材料的总称。换句话说，建造建筑物或构筑物本质上都是所用土木工程材料的一种“排列组合”，土木工程材料是土木工程不可缺少的物质基础。土木工程材料种类繁多，性能差别悬殊，使用量很大。正确选择和使用工程材料，不仅与构筑物的坚固、耐久和适用性有密切关系，而且直接影响到工程造价（因为材料费用一般要占工程总造价的一半以上）。因此，在选材时应充分考虑材料的技术性能和经济性，在使用中加强对材料的科学管理，无疑会对提高工程质量和降低工程造价起重要作用。

土木工程材料有各种不同的分类方法。如根据用途可将工程材料分为结构主体材料和辅助材料；根据工程材料在工程结构物中的部位（以工业与民用建筑为例）可分为承重材料、屋面材料、墙体材料和地面材料等；根据工程材料的功能又可分为结构材料、防水材料、装饰材料、功能（声、光、电、热、磁等）材料等。

目前，土木工程材料通常是按照组成物质的种类和化学成分分类的（见表 0-1）。

表 0-1 土木工程材料分类

无机材料	金属材料	黑色金属:钢、铁 有色金属:铝、铜等及其合金
	非金属材料	天然石材:砂石及各种石材制品 烧土及熔融制品:黏土砖、瓦、陶瓷及玻璃等 胶凝材料:石膏、石灰、水泥、水玻璃等 混凝土及硅酸盐制品:混凝土、砂浆及硅酸盐制品
有机材料	植物质材料 沥青材料 高分子材料	木材、竹材等 石油沥青、煤沥青、沥青制品 塑料、涂料、胶黏剂
复合材料	无机材料基复合材料	水泥刨花板、混凝土、砂浆、纤维混凝土
	有机材料基复合材料	沥青混凝土、玻璃纤维增强塑料(玻璃钢)

二、土木工程材料的技术标准分类

土木工程中使用的各种材料及其制品，应具有满足使用功能和所处环境要求的某些性能，而材料及其制品的性能或质量指标必须用科学方法所测得的确切数据来表示。为使测得的数据能在有关研究、设计、生产、应用等各部门得到承认，有关测试方法和条件、产品质量评价标准等均由专门机构制定并颁发“技术标准”，并做出详尽明确的规定作为共同遵循的依据。这也是现代工业生产各个领域的共同需要。

技术标准，按照其适用范围，可分为国家标准、行业标准、地方标准和企业标准等。

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。

行业标准：也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。

地方标准：是地方主管部门发布的地方性指导技术文件，其代号为 DB。

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”。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。现将国家标准及部分行业标准列于表 0-2。

表 0-2 国家及行业标准代号

标 准 名 称	代 号	标 准 名 称	代 号
国家标准	GB	交通行业	JT
建材行业	JC	冶金行业	YB
建工行业	JG	石化行业	SH
铁道部	TB	林业行业	LY

随着国家经济技术的迅速发展和对外技术交流的增加，我国还引入了不少国际和外国技术标准，现将常见的标准列入表 0-3，以供参考。

表 0-3 国际组织及几个主要国家标准

标 准 名 称	代 号	标 准 名 称	代 号
国际标准	ISO	德国工业标准	DIN
国际材料与结构试验研究协会	RILEM	韩国国家标准	KS
美国材料试验协会标准	ASTM	日本工业标准	JIS
英国标准	BS	加拿大标准协会	CSA
法国标准	NF	瑞典标准	SIS

三、土木工程材料的发展趋势

土木工程材料的生产和使用是随着人类社会生产力的发展和科学技术水平的提高而逐步发展起来的。远古时代人类只能依赖大自然的恩赐，“巢处穴居”。随着社会生产力的发展，人类进入石器、铁器时代，利用简单的生产工具能够挖土、凿石为洞，伐木搭竹为棚，从巢处穴居进入了稍经加工的土、石、木、竹构成的棚屋，为简单地利用材料迈出了可喜的一步。以后人类学会用黏土烧制砖、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。此时材料的利用才由天然材料进入到人工生产阶段，居住条件有了新的改善，砖石、砖木混合结构成了这一时期的主要特征。以后人类社会进入漫长的封建社会阶段，生产力发展缓慢，工程材料的发展也缓慢，长期停留在“秦砖汉瓦”水平上。人类社会活动范围的扩大、工商业的发展和资本主义的兴起，城市规模的扩大和交通运输的日益发达，都需要建造更多、更大、更好以及具有某些特殊性能的建筑物和附属设施，以满足生产、生活和工业等方面的需要。例如大型公共建筑、大跨度的工业厂房、海港码头、铁路、公路、桥梁以及给水排水、水库电站等工程。

显然，原有的工程材料在数量、质量和性能方面均不能满足上述的新要求。供求矛盾推动工程材料的发展进入了新的阶段。水泥、混凝土的出现，钢铁工业的发展，钢结构、钢筋混凝土结构也就应运而生。这是 18、19 世纪结构和材料的主要特征。进入 20 世纪以后，随着社会生产力的更大发展和科学技术水平的迅速提高，以及材料科学的形成和发展，工程材料的品种增加、性能改善、质量提高，一些具有特殊功能的材料也相继发展了。在工业建筑

上,根据生产工艺、质量要求和耐久性的需要、研制和生产了各种耐热、耐磨、抗腐蚀、抗渗透、防爆或防辐射材料;在民用建筑上,为了室内温度的稳定并尽量节约能源,制造了多种有机和无机的保温绝热材料;为了减少室内噪声并改善建筑物的音质,也制成了相应的吸声、隔声材料。

土木工程材料是土木工程的重要组成部分,它和工程设计、工程施工以及工程经济之间有着密切的关系。自古以来,工程材料和工程构筑物之间就存在着相互依赖、相互制约和相互推动的矛盾关系。一种新材料的出现必将推动构筑设计方法、施工程序或形式的变化,而新的结构设计和施工方法必然要求提供新的更优良的材料。例如,没有轻质高强的结构材料,就不可能设计出大跨度的桥梁和工业厂房,也不可能有高层建筑的出现;没有优质的绝热材料、吸声材料、透光材料及绝缘材料,就无法对室内的声、光、电、热等功能做妥善处理;没有各种各样的装饰材料,就不能设计出令人满意的高级建筑;没有各种材料的标准化、大型化和预制化,就不可能减少现场作业次数,实现快速施工;没有大量质优价廉的材料,就不能降低工程的造价,也就不能多快好省地完成各种基本建设任务。因此,可以说,没有工程材料的发展,也就没有土木工程的发展。有鉴于此,土木工程材料的发展方向有着以下一些趋势:

在材料性能方面,要求轻质、高强、多功能和耐久;在产品形式方面,要求大型化、构件化、预制化和单元化;在生产工艺方面,要求采用新技术和新工艺,改造和淘汰陈旧设备和工艺,提高产品质量;在资源利用方面,既要研制和开发新材料,又要充分利用工农业废料和地方材料;在经济效益方面,要降低材料消耗和能源消耗,进一步提高劳动生产率和经济效益。

材料与人类的活动是密切相联的,故人类对材料的探索与研究也早已开始,并不断向前发展。随着新材料的出现和研究工作的不断深入,以及与材料有关的基础学科的日益发展,人类对材料的内在规律有了进一步的了解,对各类材料的共性知识初步得到了科学的抽象认识,从而诞生了“材料科学”这一新的学科领域。材料科学(更准确地说应该是材料科学与工程)是介于基础科学与应用科学之间的一门应用基础科学。其主要任务在于研究材料的组分、结构、界面与性能之间的关系及其变化规律,从而使材料达到以下三个预测目的:按材料组成、工艺过程,预测不同层次的组分结构及界面状态;按不同层次的组分、结构及界面,预测力学行为或其他功能;按使用条件、环境及自身的化学物理变化,预测使用寿命。实际上,就是按使用要求设计材料、研制材料及预测使用寿命。土木工程材料也属于材料科学的研究对象,但由于种种原因,在材料科学的利用方面起步较晚。我们坚信,随着材料科学的普及和测试技术的发展,土木工程材料的研究必将纳入材料科学的轨道,那时土木工程材料的发展必将有重大突破。

四、《土木工程材料》的学习方法

《土木工程材料》在土木工程专业里是一门专业基础课,学习本课程的目的为进一步学习专业课提供有关材料的基础知识,并为今后从事设计、施工和管理工作中合理选择和正确使用材料奠定基础。

土木工程材料的内容庞杂、品种繁多,涉及到许多学科或课程,其名词、概念和专业术语多,各种土木工程材料相对独立,即各章之间的联系较少。此外公式推导少,而以叙述为主,许多内容为实践规律的总结。因此其学习方法与力学、数学等完全不同。学习《土木工程材料》时应从材料科学的观点和方法及实践的观点来进行,否则就会感到枯燥无味,难以

掌握材料组成、性质、应用以及它们之间的相互联系。学习《土木工程材料》时，应从以下几个方面来进行。

① 了解或掌握材料的组成、结构和性质间的关系。掌握土木工程材料的性质与应用是学习的目的，但孤立地看待和学习，就免不了要死记硬背。材料的组成和结构决定材料的性质和应用，因此学习时应了解或掌握材料的组成、结构与性质间的关系。应特别注意掌握的是材料内部的孔隙数量、孔隙大小、孔隙状态及其影响因素，它们对材料的所有性质均有影响，同时还应注意外界因素对材料结构与性质的影响。

② 运用对比的方法。通过对比各种材料的组成和结构来掌握它们的性质和应用，特别是通过对比来掌握它们的共性和特性。这在学习水泥、混凝土、沥青混合料等时尤为重要。

③ 密切联系工程实际，重视试验课并做好试验。《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，利用一切机会注意观察周围已经建成的或正在施工的工程，提出一些问题，在学习中寻找答案，并在实践中验证和补充书本所学内容。试验课是本课程的重要教学环节，通过试验可以验证所学的基本理论，学会检验常用材料的试验方法，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。这对培养学习与工作能力及严谨的科学态度十分有利。

第一章 土木工程材料的基本性质

本章主要是对土木工程材料的密实度与孔隙率之间的关系、吸水性、耐水性、抗渗性、抗冻性及耐久性等其他基本性质进行介绍与评价。

在各类土木工程建筑中，材料是构成土木工程的物质基础，在不同的外部环境和构造部位上，由于受到各种物理、化学、力学等因素的影响及作用，要求其使用的相应材料应具有良好的物力性能、力学性能、耐久性能等。例如：结构材料应具有良好的抗拉、抗压等力学性能及耐久性能；装饰性材料应具有良好的装饰性、耐氧化、耐紫外线等性能。

由此可见材料的性能在土木工程建筑中起着至关重要的作用，同时为了保证土木工程的质量，满足安全、美观、经济、耐久等基本要求，更需要我们掌握好材料的基本性质，正确地选择和使用土木工程材料。

第一节 材料的组成、结构与构造

材料的组成、结构和构造决定着材料各项性质。要了解材料的性质就必须先了解材料的组成、结构和构造，以及它们之间与材料性质的关系。

一、材料的组成

材料的组成一般包括化学组成、矿物组成和相组成三个方面。

（一）化学组成

材料的化学组成（chemical composition or chemical constituent）即材料的化学成分，是指构成材料的化学元素及化合物的种类和数量。无机非金属材料化学组成常以各种氧化物的含量来表示，金属材料则常以各化学元素的含量来表示，有机材料常用各化合物的含量来表示。

化学组成是决定材料化学性质、物理性质、力学性质的主要因素之一。如材料的耐腐蚀性、耐热性、耐水性、保温性、强度、变形等。

（二）矿物组成

材料科学常将具有特定的晶体结构、特定的物理力学性能的组织结构成为矿物。矿物组成（mineralogical composition）是指构成材料的矿物种类和数量。多数的无机非金属材料是由各种矿物组成的。矿物组成是决定无机非金属材料化学性质、物理性质、力学性质和耐久性的重要因素。

材料的化学组成不同，则材料的矿物组成也不同。而相同的化学组成，也可以有不同的矿物组成，且材料的性质也不一样。例如，石墨和金刚石同是碳元素组成，但矿物组成和材料性质却有很大区别。

（三）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不同、温度、压力和环境条件不同，可形成不同的相。例如，在碳铁合金中就有铁素体、渗碳体、珠光体。同种物质在不同的温度、压力等环境下也常常会转变其存在的状态。例如，水（ H_2O ）可以在不同的温度、压力下变成气相、液

相或固相。土木工程材料多数是多相固体材料,这种有两相或两相以上物质组成的材料,称为复合材料。例如,混凝土就是有骨料(集料相)和水泥浆(基相)组成的两相复合材料。

了解了材料的组成我们可以大致判断出材料某些性质。如材料的组成易于周围介质发生化学反应(酸、碱、盐等),则该材料的耐腐蚀性可能比较差;而有机材料根据其组成可判断出其耐火性和耐热性较差,多数可以燃烧;合金材料的强度往往高于非合金的材料等。

二、材料的结构

材料的结构决定着材料的许多性质,是决定材料性能的另一个重要因素。一般可分为宏观结构、亚微观机构和微观结构三个层次。

(一) 宏观结构

材料的宏观结构(macrostructure or macrostructure structure)是指用肉眼或放大镜能够分辨的毫米级以上的粗大组织。该结构主要研究材料中的大孔隙、裂纹、不同材料的组合与复合方式、各组成材料的分布等。

材料的宏观结构按其孔隙特征可分为:

① 致密结构 指具有不可吸水、透气的孔隙结构。如钢材、玻璃、沥青、部分塑料、橡胶等。

② 多孔结构 指具有粗大孔隙的结构。如泡沫塑料、泡沫玻璃、加气混凝土等。

③ 微孔结构 指具有微细孔隙的结构。如石膏制品、低温烧结黏土制品。

按其组织结构特征可分为:

① 堆聚结构 指有集料与具有胶凝性或黏结性物质胶结而成的机构。如水泥混凝土、砂浆、沥青混合料等。

② 纤维结构 指由天然或人工合成纤维物质构成的结构。如木材、玻璃钢、岩棉等。

③ 层状结构 指由天然形成或人工黏结等方法而将材料叠合而成的双层或多层结构。如胶合板、蜂窝板、纸面石膏板等。

④ 散粒结构 指由松散粒状物质所形成的结构。如混凝土骨料、粉煤灰、膨胀珍珠岩等。

(二) 亚微观结构

材料的亚微观结构(sub-microstructure)是指可用光学显微镜观察到的微米(1×10^{-6} m)级的材料组织结构。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,孔隙与微裂缝的大小、形状及分布。

土木工程中材料的亚微观结构,只能针对某种具体材料来进行分类研究。例如: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、非晶体组织;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。

材料亚微观结构层次上的各种组织结构,性质和特点各异,它们的特征、数量和分布对土木工程材料的性能有重要的影响,如对材料的强度、耐久性等都有很大的影响。同时材料的亚微观结构也相对较容易改变。

一般而言,材料内部的晶粒越细小、分布越均匀,则材料的受力状态越均匀、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黏结或接触越好,则材料的强度和耐久性也就越高。

(三) 微观结构

材料的微观结构(microstructure)是指材料分子级或原子级层次的结构。一般可用电

子显微镜或 X 射线来进行分析和研究。

材料的微观结构可分为晶体结构、非晶体结构和胶体。

1. 晶体结构

晶体结构 (crystal structure) 是指质点 (离子、原子、分子) 在空间上按特定的规则, 呈周期性排列时所形成的结构。由于质点在各方向上排列的规律和数量的不同, 单晶体具有各向异性的性质。按晶体的质点间结合键的特性, 晶体又可分为离子晶体、原子晶体、分子晶体和金属晶体。

(1) 离子晶体

离子晶体是指正负离子以离子键结合而成的晶体, 如氯化钠、石膏、石灰岩等。其主要特征有: 强度、硬度、熔点均较高, 但波动大, 部分可熔, 密度中等。

(2) 原子晶体

原子晶体是指中性原子以共价键结合而成的晶体, 如金刚石、石英、刚玉等。其主要特征有: 强度、硬度、熔点均较高, 但密度较小。

(3) 分子晶体

分子晶体是指以分子间的范德华力即分子建结合而成的晶体, 如绝大多数有机化合物 (苯、乙酸、乙醇) 等。其主要特征有: 强度、硬度、熔点均较低, 大部分可溶密度小。

(4) 金属晶体

金属晶体是指晶格结点上排列金属原子-离子时所构成的晶体, 如镁、铝、铁和铜等。其主要特征有: 强度、硬度变化大, 密度大等。

无机非金属材料中的晶体, 其键的构成往往不是单一的, 而是由共价键、离子键等共同联结, 如方解石、长石及硅酸盐类材料。

在土木工程中占有重要地位的硅酸盐类材料, 其晶体是由硅氧四面体 SiO_4 为基本单元与其他金属离子结合而成。硅氧四面体单元可以组成链状构造、层状构造、架状构造和岛状构造的硅酸盐晶体。

2. 非晶体结构 (non-crystal structure or amorphous structure)

非晶体又称玻璃体, 是指组成物质的分子 (或原子、离子) 不呈空间有规则周期性排列的固体。非晶体没有一定规则的外形, 如玻璃、松香、石蜡等。它的物理性质在各个方向上是相同的, 叫 “各向同性”。非晶体没有固定的熔点, 所以有人把非晶体叫做 “过冷液体” 或 “流动性很小的液体”。非晶体的强度和导热性等低于晶体。非晶体的化学稳定性较差、活性高, 易和其他物质反应或自行缓慢向晶体转变。如在水泥、混凝土中使用的粒化高炉矿渣、火山灰、粉煤灰等活性混合料, 正是利用了它们活性高的特点。

3. 胶体

胶体 (colloid) 又称胶状分散体 (colloidal dispersion) 是一种均匀混合物, 在胶体中含有两种不同状态的物质, 一种分散, 另一种连续。分散的一部分是由微小的粒子 (胶粒) 或液滴所组成, 大小介于 $1\sim 100\text{nm}$ 之间, 且几乎遍布在整个连续相态中。胶体是一种分散质粒子直径介于粗分散体系和溶液之间的一类分散体系, 这是一种高度分散的多相不均匀体系。

在胶体结构中, 若胶粒较少, 则胶粒悬浮、分散在液体连续相中。此时液体的性质对胶体的性质影响较大。这种结构称为溶胶结构。若胶粒较多, 则胶粒在表面能作用下发生凝聚, 彼此相连形成空间网络结构, 而使胶体强度增大, 变形减小, 形成固体或半固体状态, 这种结构称为凝胶结构。在特定的条件下, 胶体亦可形成溶胶-凝胶结构。与晶体及非晶体

结构相比,交替结构的强度较低,变形较大。

三、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。如木材的宏观构造、微观构造就是指具有相同的结构单元——木纤维细胞,按不同的形态和方式在宏观和微观层次上的搭配和组合情况。它决定了木材的各向异性等一系列物理力学性质。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、坚固耐久等功能性质。

随着材料科学与工程理论技术的不断发展,深入地研究材料的组成、结构、构造和材料性能之间关系,不仅有利于包括土木工程在内的各种工程正确的选用材料,更会加速人类对具有特殊性能的新材料的开发和研究,为人类工程学和其他学科的进步提供有益的帮助。

思考与练习

1. 什么是材料的化学组成,它对材料的性质有哪些影响?
2. 材料的宏观结构按其孔隙特征可分为哪些种类?
3. 材料的宏观结构按其组织结构特征可分为哪些种类?
4. 什么是材料的亚微观结构,其主要研究的内容是什么?
5. 材料的微观结构可分为哪些种类?

第二节 材料的物理性质

一、材料与质量有关的性质

(一) 密度

密度(density)是指材料在绝对密实的状态下,单位体积的质量。用公式表示为

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

式中 ρ ——密度, g/cm^3 ;

m ——材料在干燥状态下质量, g ;

V ——干燥材料在绝对密实状态下的体积, cm^3 。

材料在绝对密实状态下的体积是指不包含材料内部孔隙在内的固体物质本身的体积。在土木工程材料中绝大多数材料都含有一定的孔隙,少数材料(如玻璃、钢材等)除外。测定有孔隙的材料(如砖、石等材料)密度时,应首先将其磨成粉末,经干燥后,用李氏瓶法测定其体积,然后可按式(1-1)计算其密度,材料磨的愈细其值愈准确。

(二) 表观密度

表观密度(apparent density)是指材料在表观状态下,不含开口孔隙时单位体积的绝干质量。用公式表示为

$$\rho_a = \frac{m}{V_a} \quad (1-2)$$

式中 ρ_a ——表观密度, g/cm^3 或 kg/m^3 ;

m ——材料的质量, g 或 kg ;

V_a ——材料在表观状态下不含开口孔隙的体积或称表观体积， cm^3 或 m^3 。

测定材料的表观密度时，可直接采用排水法测定材料的体积。

(三) 体积密度

体积密度 (bulk density) 是指材料在自然状态下，含内部所有孔隙时单位体积的质量。

用公式表示为

$$\rho_0 = \frac{m}{V_0} \tag{1-3}$$

式中 ρ_0 ——体积密度， g/cm^3 或 kg/m^3 ；

m ——材料的质量， g 或 kg ；

V_0 ——材料在自然状下的体积， cm^3 或 m^3 。

材料在自然状态下的体积，包含材料内部所有开口和闭口孔隙的体积。对于规则形状的材料可直接测定其外观尺寸，计算其体积。对于不规则形状的材料，则需在材料表面涂蜡后用排水法测得。

材料的体积密度除与材料的密度有关外，还与材料内部孔隙的体积有关，材料的孔隙率越大，则材料的体积密度越小。材料的体积密度与含水率大小也有关，含水率也越高，则体积密度越大。因此，测定或给出体积密度时应说明材料含水率的情况。

通常所指的材料体积密度是材料在气干状态下的，称为气干体积密度，简称体积密度。

(四) 堆积密度

堆积密度 (packing density) 是指粉状或粒状材料在容器中自然堆积状态下单位体积的质量，用公式表示为

$$\rho'_0 = \frac{m}{V'_0} \tag{1-4}$$

式中 ρ'_0 ——堆积密度， kg/m^3 ；

m ——材料的质量， kg ；

V'_0 ——材料的堆积体积， m^3 。

材料在自然堆积状态下的体积包含两个部分一部分是材料的表观体积，一部分是材料颗粒间的空隙体积。粉状或粒状材料的体积可用以标定容积的容器来填装测得，若以捣实体积计算时则称紧密堆积密度。

在土木工程中，计算材料的用量、构件自重、配料计算、确定堆放空间及运输量时，经常要用到材料的密度、表观密度和堆积密度。常用的土木工程材料的有关密度数据见表 1-1。

表 1-1 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/cm^3)	堆积密度/ (kg/cm^3)
木材	1.55	400~800	—
钢材	7.85	7850	—
水泥	3.20	—	1200~1300
普通混凝土	—	2100~2600	—
砂	2.60	—	1450~1560
碎石	2.60	—	1450~1650
普通黏土砖	2.50	1600~18000	—