



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

土木工程材料

(第二版)

邓德华 主编



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
普通高等学校土木工程专业新编系列教材

土 木 工 程 材 料

(第二版)

邓德华 主编

冯乃谦 主审

中 国 铁 道 出 版 社

2010年·北 京

内 容 简 介

本教材为适应土木工程本科专业拓宽专业口径而编写,属于铁道工程、桥梁工程、房屋建筑、公路与城市道路、隧道与地下建筑、矿山建筑等群组的专业基础课程(又称技术基础课)教材。全书包括绪论、土木工程材料导论、无机胶凝材料、混凝土、砌体材料、金属材料、木材、高分子材料、沥青材料、纤维复合材料、建筑功能材料等。

本书也可供有关科研、生产、施工人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

土木工程材料/邓德华主编. —2版. —北京:

中国铁道出版社, 2010. 9

普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 普通高等学校土木工程专业新编系列教材

ISBN 978-7-113-11979-9

I. ①土… II. ①邓… 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(2010)第 184670 号

书 名: 土木工程材料 (第二版)

作 者: 邓德华 主编

责任编辑: 李丽娟 电话: 010-51873135 电子信箱: LLJ704@163.com 教材网址: www.tdjiaocaicom

编辑助理: 张 博

封面设计: 薛小卉

责任校对: 孙 玫

责任印制: 陆 宁

出版发行: 中国铁道出版社 (100054, 北京市宣武区右安门西街 8 号)

网 址: <http://www.tdpress.com>

印 刷: 三河市华丰印刷厂

版 次: 2004 年 8 月第 1 版 2010 年 9 月第 2 版 2010 年 9 月第 8 次印刷

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16 印张: 26.75 字数: 672 千

书 号: ISBN 978-7-113-11979-9

定 价: 45.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社读者服务部调换。

电 话: 市电 (010) 51873170, 路电 (021) 73170 (发行部)

打击盗版举报电话: 市电 (010) 63549504, 路电 (021) 73187

前言

本教材是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,是普通高校土木工程本科专业的技术基础课教材,适应于土木工程学科各本科专业教学要求。

本教材原则上根据高等学校土木工程专业指导委员会编制的《土木工程材料》教学大纲要求编写,但以介绍基本土木工程材料为主,功能性建材制品为辅。全书共有10章,包括三个知识模块:其一,从土木工程使用要求出发,以材料科学导论的视角,介绍材料的组成、结构、性能与制备工艺相互间的关系和基本规律,为后续章节的学习打下材料学方面的理论基础;其二,介绍无机胶凝材料、混凝土、砌筑材料、金属材料、木材、高分子材料、沥青基材料、纤维增强复合材料等基本土木工程材料的组成、结构、性能以及工程行为特点等方面的基本原理与知识;其三,介绍几种具有显著建筑功能的材料制品的组成、构造和性能特点等方面的基本知识。同时在本教材中详细介绍了已在土木工程中应用得越来越多的纤维增强复合材料及其相关知识。

本教材力求突出重点,彰显特色,在土木工程科学技术与材料科学技术间架起一座桥梁,构建起“土木工程材料”课程的知识框架,让学生们通过对本门课程的学习,能从土木工程结构和施工应用要求出发,运用材料科学技术的理论与概念,理解和掌握基本土木工程材料的组成、结构、性能和工程行为特点等方面的基本概念、基本原理与规律、基本知识和基本技能等,为学生今后从事土木工程领域中的技术工作,就土木工程材料的选择、检验、质量控制、施工应用,以及土木工程材料研发与创新等方面奠定坚实的基础,本课程也为土木工程专业的后续课程提供基本知识。

本教材由中南大学邓德华主编,清华大学冯乃谦主审。参加编写工作的有:中南大学邓德华(绪论、第1、7、9、10章和第3.1、3.2、3.3、3.7节),北京交通大学朋改非(第2章),中南大学胡晓波(第3.8、3.9节和第4章),中南大学刘宝举(第3.4、3.11、3.12节和第6章),中南大学李益进(第3.5、3.6节),中南大学龙广成(第3.10节),西南交通大学李国华(第5章),中南大学尹健(第8章),中南大学李建、石明霞(附录)。

在本教材的编写过程中,得到编者所在院校和同仁们的大力支持和帮助,在此深表感谢!教材中有不妥和遗漏之处,敬请广大读者和同仁们批评指正。

编者

2010年7月于长沙

目 录

绪 论	1
0.1 土木工程与土木工程材料	1
0.2 土木工程材料的种类与发展	2
0.3 土木工程材料的检验与选用	3
0.4 本课程的性质与学习内容	4
第1章 土木工程材料导论	5
1.1 材料的组成与结构	5
1.2 材料的物理性质	13
1.3 材料的力学性质	21
1.4 材料的耐久性与安全性	27
习 题	30
第2章 无机胶凝材料	31
2.1 引 言	31
2.2 气硬性胶凝材料	31
2.3 硅酸盐水泥	40
2.4 其他品种硅酸盐水泥	60
2.5 硫铝酸盐水泥	68
2.6 铝酸盐水泥	72
习 题	75
第3章 混 凝 土	77
3.1 概 述	77
3.2 混凝土的组成材料与结构	78
3.3 新拌混凝土的性质	93
3.4 混凝土的早期行为	98
3.5 混凝土的变形行为	101
3.6 混凝土的强度与破坏	107
3.7 混凝土的耐久性	114
3.8 混凝土质量控制与评定	121
3.9 混凝土配合比设计	125
3.10 高强高性能混凝土	132

3.11	轻混凝土	134
3.12	其他混凝土	140
习 题		146
第4章	砌筑材料	149
4.1	砖与砌块	149
4.2	天然石料	159
4.3	人造石材	163
4.4	砂 浆	164
习 题		172
第5章	金属材料	173
5.1	概 述	173
5.2	钢材的生产与分类	173
5.3	钢材的组成与结构	176
5.4	钢材的技术性质	182
5.5	钢材的强化	187
5.6	建筑钢材的标准与选用	189
5.7	钢材的锈蚀与防止	199
5.8	有色金属材料	201
习 题		204
第6章	木 材	205
6.1	木材的种类及结构	205
6.2	木材的性质	207
6.3	木材的防护处理	212
6.4	木材的综合利用	213
习 题		214
第7章	高分子材料	215
7.1	概 述	215
7.2	聚合物基础知识	216
7.3	工程塑料	233
7.4	橡 胶	239
7.5	有机纤维	241
7.6	高分子胶黏剂	245
习 题		249
第8章	沥青及沥青基材料	251
8.1	概 述	251
8.2	石油沥青	252

8.3 煤 沥 青	259
8.4 石油沥青的改性	261
8.5 沥青混合料	264
习 题	292
第9章 纤维增强复合材料	293
9.1 概 述	293
9.2 纤维增强复合材料的增强材	297
9.3 钢纤维混凝土	300
9.4 非金属纤维增强水泥基复合材料	315
9.5 纤维增强树脂基复合材料	328
习 题	339
第10章 建筑功能材料	341
10.1 防水材料	341
10.2 绝热材料	353
10.3 吸声材料	357
10.4 建筑装饰材料	359
习 题	369
附录 土木工程材料试验	371
F.1 试验一——水泥试验	371
F.2 试验二——骨料试验	377
F.3 试验三——混凝土拌合物试验	384
F.4 试验四——普通混凝土力学性能试验	388
F.5 试验五——混凝土耐久性试验	394
F.6 试验六——建筑钢材试验	407
F.7 试验七——石油沥青试验	413
F.8 试验八——沥青混合料马歇尔稳定度试验	415
参考文献	419

绪 论

0.1 土木工程与土木工程材料

土木工程(Civil Engineering)是指运用数学、物理、化学等基础科学知识和力学、材料学等技术科学知识,以及土木工程方面的工程技术知识来研究、设计、建造各种工程设施的一门学科。土木工程包括建筑工程、桥梁与隧道工程、道路与铁道工程、岩土工程、市政工程等分支学科,它们对国家经济建设和人民生活都是非常重要的,和人们的衣食住行是紧密相连的。

大学的土木工程专业主要培养从事铁路、公路、房屋、桥梁、隧道、水坝、地下工程等设施的规划、勘测、设计、施工、养护等技术和研究工作的高层次人才,毕业后主要从事土木工程的设计、建造与维护管理等工程技术工作。

土木工程材料是指工程实施建造中使用的各种工程材料和制品,它是土木工程的物质基础,如石材、砖、砂浆、水泥、混凝土、钢材、木材、建筑塑料、沥青等。土木工程材料学科是材料学与土木工程学交叉发展起来的分支学科,其研究内容涉及工程材料的组成、结构、性能及其相互关系,材料的环境行为与服役性能,材料性能的检验与评价方法以及制备与施工工艺及其对材料组成、结构和性能的影响等。

土木工程材料在土木工程及其技术中有着举足轻重的作用,土木工程材料与土木工程技术的发展历来就是相互促进,相辅相成的,土木工程中新问题的不断出现,刺激了新材料、新技术和新方法的创造和发明,而新材料及其技术的发明又促使土木工程及其技术的进步与变革。土木工程的发展经历了古代、近代、现代三个历史时期,而这三个历史时期均与土木工程材料的出现或发明有关。人类最早穴居巢处,几乎没有土木工程材料的概念;进入到石器、铁器时代,开始掘土凿石为洞,伐木搭竹为棚,利用最原始的天然材料建造最简陋的房屋;后来,用黏土烧制砖瓦,用岩石制石灰与石膏,开始从天然材料进入了人工材料时期,为建造较大的工程设施创造了条件,出现了砖石结构的构筑物,如我国的万里长城、赵州桥、古埃及的金字塔等;公元8世纪后,科学技术的发展促使土木工程材料进入了一个新的发展时期,钢铁、水泥、混凝土及其他材料相继问世,为现代土木工程学奠定了基础,出现了钢筋混凝土结构、钢结构的大型构筑物;20世纪后,土木工程材料性能和质量的改善与提高,品种的不断增加,以高分子材料为主的化学建材的异军突起,为高层建筑、大跨度桥梁、高速公路与铁路等大型工程设施的建造提供了高性能土木工程材料及其施工技术;一些具有特殊功能或智能的材料制品如绝热材料、吸声隔热材料、耐火防火材料、防水抗渗材料、防爆防辐射材料应运而生,为更加舒适、节能、低耗的构筑物建设提供了强有力的物质保障。

土木工程材料学知识在土木工程的设计、建造、维护的技术和方法上起着非常重要的作用。人们希望每一项工程都是一个完美的工程,在使用条件下能有很好的行为。历史已证明工程质量的优劣和一个能在使用条件下长期发挥其良好功能的工程设施,在很大程度上取决于正确地选择和使用土木工程材料。在满足相同技术指标和质量要求的前提下,选择不同的

材料和不同的使用方法,对工程的质量、服役性能与全寿命成本有直接的影响。因此,为了更好地利用土木工程材料并满足人们生产、生活和其他活动的需要与审美要求,做到各类土木工程既能安全可靠地承受各种作用力和环境荷载,发挥其应有功能,又能经济而迅速地完成其建造任务,设计者、建造者和维护管理者必须充分了解和掌握土木工程材料的知识,以便发挥它们的最大功效。为此,我们需要了解材料的三个方面知识:

- (1)工程材料在工程设施及其使用过程中的行为如何?
- (2)为什么工程材料在使用过程中有其自身的行为?
- (3)可以从哪些方面优化和改善工程材料的行为和性能?

土木工程专业的学生在校期间,将主要通过土木工程材料课程的学习与实践训练,获得并掌握土木工程材料的知识和应用技能,以便将来在实际工作中合理选择与正确使用土木工程材料。

0.2 土木工程材料的种类与发展

0.2.1 分 类

土木工程材料的品种繁多,其作用和功能各异,包括了无机和有机材料、金属和非金属材料、各种复合材料和功能(智能)材料等,为方便应用,常按不同原则分类。

- (1)按材料来源,可分为天然材料和人造材料;
- (2)按使用功能,可分为结构材料和功能材料;
- (3)按组成材料的物质属性和化学成分,可分为无机材料、有机材料和复合材料。

由于工程材料的性能、制备和施工方法与组成材料的物质属性密切相关,因此,一般按照后一种分类原则,将土木工程材料进行分类,见表 0-1。

表 0-1 土木工程材料的种类

类 别	种 类	
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:黏土砖、瓦、玻璃、陶瓷等
		胶凝材料及其制品:石灰、石膏、水玻璃、水泥、混凝土、砂浆及硅酸盐制品等
有机材料	天然高分子材料:木材、竹材、石油沥青、煤沥青、沥青混凝土等	
	高合成分子材料:塑料、涂料、胶黏剂、合成橡胶、合成纤维及其织物等	
复合材料	有机材料基复合材料:纤维增强塑料、树脂混凝土等	
	无机材料基复合材料:钢纤维混凝土、纤维水泥材料、纤维陶瓷等	
	有机—无机复合材料:聚合物水泥混凝土、沥青水泥砂浆等	
	金属—非金属复合材料:金属陶瓷、金属玻璃等	

0.2.2 发展趋势

随着科学与技术的不断进步和土木工程对工程材料日益增长的要求,促使土木工程材料在不断地发展,其发展趋势主要表现在以下几方面:

- (1)高性能或超高性能化 如结构材料的强度不断提高,使用寿命不断延长等。
- (2)复合化 为了弥补单一组成材料的性能缺陷,采用原子、分子、物相、构造等不同层次的复合技术,制备有机—无机、金属—非金属、晶体—非晶体等复合材料。

(3) 多功能化 结构材料不但具有承载能力,还可兼有保温、防水、装饰等功能。

(4) 制备与施工机械化 如混凝土商品化、泵送施工等。

(5) 绿色化 大量采用工业废料废渣,减少资源消耗,降低生产能耗,要求工程材料生产与使用过程中对环境和人们的健康无害等。

0.3 土木工程材料的检验与选用

0.3.1 检 验

土木工程材料进入工程施工现场前需要进行检验,检验是考查工程材料或制品是否满足土木工程的要求,包括测量尺寸、称重、用锤子敲击、用指甲或小刀划痕以及许多其他操作,其中有些可以称为试验。检验中发现的问题需要由试验来确定。

试验是将一些可测量的因素施加于材料,测量材料对其的响应。如在材料的试样上施加外力直到材料破坏或使其变形超过一定值的力学试验,以直接测量材料的强度;有些试验是通过测量其他物理量来间接预测或评价材料的特性,例如,岩石骨料的抗冻融与抗风化试验是将骨料浸泡在硫酸钠或硫酸镁溶液中,然后在干燥箱中干燥,如此反复循环若干次后,测量试样的质量损失率作为其抗冻融与抗风化性能的评价指标。

土木工程材料的检验和试验的目的可以分为以下几类:

(1) 接受试验 为了决定是否接受供应商提供的材料或制品而进行的检验和试验,以确定材料或制品是否满足性能要求。

(2) 质量控制 对材料进行定期抽样检验和试验,以确定材料或制品的性能和质量是否稳定和可接受。如果试验表明产品性能指标低于其技术标准要求,就需要分析原因,再采取正确的措施,以保证质量。

(3) 研究与开发 进行检验与试验以确定新材料或产品的组成、制备工艺和特性。材料制造商在新产品投放市场前,需要进行广泛的试验。

用于接受或质量控制的试验必须要在短时间内得到结果,不能干扰生产或延误施工。所以,能准确反映材料实际性能的快速、低成本试验广泛用于验收或质量控制中。

土木工程材料或制品的检验和试验应按照一定的标准进行,这些标准一般应包含适用范围、性能指标要求、试验条件、试验设备及其要求、试验方法、试验结果处理、抽样和检验规则、评判规则等。我国的标准体系包括国家标准、行业或协会标准和企业标准等。另外,根据标准执行的力度,国家标准和行业或协会标准又分为强制性标准和推荐性标准,强制性标准的执行力度是强制性的,例如,有关硅酸盐水泥的国家标准就是强制性的。在进行土木工程材料或制品的检验或试验时,必须严格执行相关标准或规范的规定。

0.3.2 选 择

在工程设施的设计、建造和维修活动中,经常会遇到土木工程材料的选择问题,而且总是希望所选择的材料对于工程应用是最满意的,任何最满意的选择都需要土木工程材料的知识和合理的选择程序。

任一项工程实施均涉及三方:业主、设计者和建造者。一个工程项目首先源自业主,如建一座桥梁、公路、铁路、高层建筑等,业主提出项目建设成本和服务功能要求,选择设计者来承担所有土木工程材料的选择,以期在预算成本内取得所要求的功能。设计者通过综合考虑每

种工程材料的功能、外观和全寿命成本(初始成本与预期使用寿命内的维护成本之和),反复比较后选择满足要求的工程材料和制品,也可制定说明文件来描述工程材料的性能要求,由建造者根据性能要求与说明来选择工程材料。选择工程材料的一般程序如下:

- (1)问题(要求的性能与使用寿命、允许的成本和维护费用)分析;
- (2)根据上述标准,对材料或制品进行比较;
- (3)工程材料尺寸、形状、外观、保存方法和现场安装施工方法的设计或选择。

0.4 本课程的性质与学习内容

在土木工程专业技术人才的培养计划中,“土木工程材料”是一门专业基础课,具有鲜明的工程特点和实用性,要求从工程应用出发,运用材料科学的原理、方法和手段,研究和分析土木工程材料组成、结构和性能及其对土木工程设计、施工与维护管理等的影响。因此,本课程将注重材料科学知识 with 土木工程技术及实践紧密结合,为土木工程各专业人才的培养打下扎实的土木工程材料知识与技能的基础。通过本课程的学习,要求学生掌握基本土木工程材料的性质、制备和用途以及质量检测和控制方法,理解土木工程材料性质与其组成、结构、制备工艺的关系及相关基本理论,了解性能改善的技术和途径,为后续课程的学习以及进行课程与毕业设计提供土木工程材料的基础知识和技能训练,并为学生在以后的专业技术工作中,能针对不同工程类型和服役环境,合理选用工程材料、正确选择设计参数及施工工艺,以及材料验收、质量鉴定、材料试验、储存运输、防腐处理和试验研究等方面打下必要的基础。

土木工程材料种类繁多,内容庞杂,为了适应我国国民经济发展和土木工程领域科技进步,充分反映土木工程材料及其应用领域的最新科技成果,充分体现知识的科学性、先进性和实用性,更加适应土木工程学科各专业的教学体系和培养目标,本课程的学习内容以基本土木工程材料及其相关知识为主,兼顾介绍新型建筑功能材料与制品的原则。课程内容分为六个知识模块:土木工程材料导论(绪论和第1章);无机非金属材料(第2、3、4章);金属材料(第5章);有机材料(第6、7、8章);纤维复合材料(第9章)和建筑功能材料(第10章)。

在学习过程中,应以材料的技术性质、应用范围和质量检验与评定方法为重点,但也应了解材料组成、结构和生产、施工工艺对其性能的影响,必须注意分析和比较同类材料不同品种的共性与特性、材料各种性能间的联系,以及不同种类材料间的显著异同点,以便在选择材料时,能针对工程实际条件和要求,做出正确的抉择。

为了巩固课堂知识,培养能力,必须认真做好土木工程材料试验。通过试验操作,熟悉试验设备和试验操作技能,具体了解材料性质的检验方法和必要的技术规范,为将来参加实际的材料检验和试验研究工作打下基础。

进行材料试验的步骤如下:

- (1)选取有代表性的样品作为试样或按照规定制备试件;
- (2)选择适当精度的试验仪器设备;
- (3)按照规定的试验方法进行试验操作,做好试验记录;
- (4)整理试验数据,并对问题进行分析与讨论,找出规律,得出结论;
- (5)写出试验报告。

试验报告必须认真撰写,应包括试验目的、试验样品、试验方法与原理、试验数据、分析与讨论、结论、存在的问题和自己的心得体会等内容,以加深对知识的理解和掌握。

第 1 章

土木工程材料导论

各类建筑物和铁路、公路、桥梁、隧道、水坝、港口等工程设施均是由土木工程材料组合或堆砌而成的,因此,为满足各种工程设施的功能、安全和使用寿命的要求,在工程设计与施工中,必须了解和熟悉土木工程材料的基本性能:

- (1)施工性能:如流变性、可加工性、可焊性、黏结性能等;
- (2)物理性能:如密度、表面性能、热学性能、电学性能、声学性能、光学性能等;
- (3)力学性能:如强度、刚度、韧性、脆性、弹性、塑性、硬度、疲劳等;
- (4)耐久性能:如热稳定性、抗化学腐蚀性、抗水性、抗老化性、抗冻融性等。

此外,还需掌握土木工程材料性能的影响因素和改善途径。

工程材料的各项性能均与材料的组成、状态、结构构造等有关。因此,从事土木工程的技术人员,必须具备相关材料科学知识,才能更好地理解和掌握土木工程材料的知识和技能。

本章主要介绍材料的组成、结构构造和材料的力学、物理和耐久性能,以及它们相互间的关系,为后续章节的学习打下必要的材料科学知识基础。

1.1 材料的组成与结构

1.1.1 材料的物理状态及其特性

材料是物质,物质是由粒子构成的,因粒子的聚集状态不同,而呈气态(体)、液态(体)、胶态(体)和固态(体)等不同的物理状态。气体和液体(包括溶液、悬浊液)统称为流体,流体在外力作用下容易流动,产生较大变形;固体可以承受外力作用而只发生微小变形;胶体在受外力时的行为介于流体和固体之间。

(1)流体及其特性

气体粒子相互间没有直接接触,而是处于不断无规则运动中。因此,气体具有如下特点:

- ①密度小,黏度低,可以膨胀充满整个容器,其外形取决于容器;
- ②可压缩,且对容器各个壁的压强相等;
- ③容易相互扩散、混合。

利用气体的这些特点,可以制成充气屋顶、发泡材料等轻质工程材料和制品。

与气体相比,液体具有如下特点:

- ①液体是凝聚态,其密度和黏度比气体高几倍或几个数量级;
- ②液体几乎是不可压缩的;
- ③相容的液体可相互扩散与混合,不相容的液体难以扩散与混合。

流体重要特性是可流动性,即施加一定的剪切力就可使流体产生不可逆流动。严格讲,这是一种剪切变形,即流体的一部分相对于另一部分产生滑动。对于理想(牛顿)流体,剪切变形速率 $d\gamma/dt$ 与外加剪切应力 τ 成正比:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \beta \tau \quad \text{或} \quad \tau = \eta \frac{d\gamma}{dt} \quad (1-1)$$

式中 β 为流动度; η 为动力黏度系数, 简称为黏度, 单位是 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。 β 与 η 互为倒数, 流体的黏度越大, 流动(剪切变形速率)就越慢。

流体的黏度与密度或浓度有关, 因而, 气体和液体的黏度差别很大。 20°C 时, 空气的黏度 $\eta \approx 1.8 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 水的黏度 $\eta \approx 1.5 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。 温度升高, 粒子的能量提高, 则粒子运动所需的应力减小, 即黏度随温度升高显著减小。

大多数流体是非理想流体, 因此, 其流变行为会偏离公式(1-1), 例如, 新拌水泥砂浆或混凝土就可用宾汉姆流变公式来描述其流变行为:

$$\tau = \tau_0 + \eta \frac{d\gamma}{dt} \quad (1-2)$$

式中, τ_0 称为剪切屈服应力(Pa)。 公式(1-2)表明, 只有当剪切应力大于屈服应力时, 流体才会流动, 流动后的流变行为又与理想流体相似。

流体的另一特性是可扩散性, 扩散是一种粒子的迁移运动, 是由彼此连续碰撞的单个原子或分子的无数无规迁移引起的, 这种迁移运动足够多时就会产生稳流。 流体的扩散是在浓度梯度的驱动下发生的, 且总是由浓度较高的区域向浓度较低的区域扩散, 并以稳态或非稳态方式进行扩散, 其扩散速率与浓度梯度的关系可用菲克第一或第二扩散定律来描述, 即

$$J = -D \frac{dC}{dx} \quad \text{或} \quad J = -D \frac{d^2 C}{dx^2} \quad (1-3)$$

式中, J 为在浓度梯度方向(x)上单位时间内通过单位横截面积上的流体粒子数, 即流量; 流体扩散速率与浓度梯度 dC/dx 成正比, 其比例系数 D 称为扩散系数。 因为扩散朝着梯度降低的方向进行, 所以加负号。 此外, 因温度升高, 粒子更活泼, 所以扩散速率随温度升高而呈指数函数增加; 反之亦然。

流体的扩散规律有很重要的工程技术应用, 例如, 可分别用菲克第一和第二定律来描述大气中的 CO_2 气体和海水在混凝土中的扩散规律, 以讨论和分析混凝土的耐久性。

(2) 固体及其特性

固体是凝聚态, 组成固体的原子相互键合在一起, 构成并保持其几何形状, 当施加一个外力时, 固体中所有原子的位置会发生改变, 但固体中最邻近的原子不会像流体那样产生相互换位或相对滑移(除非外力足够大而破坏原子间的键合)。 因此, 固体可以承受外力的作用, 且只发生微小的变形。

(3) 胶体及其特性

当液体是高度浓缩的很细的固态颗粒($<1 \mu\text{m}$)分散体时, 则形成了胶体。 由于浓度很高, 以致固态颗粒(胶粒)相互结合成疏松的堆聚结构, 而液体存在于胶粒间隙中。 胶体可以是黏稠性液体, 也可是半刚性或刚性固体, 这取决于所形成的胶粒间结合点数量。 根据胶体中胶粒结合点数量和结合力强弱, 可以分为溶胶和凝胶。

①溶胶 如果胶粒间结合点很少或结合力较弱, 单个微粒可围绕其接触点自由移动, 则胶体像液体一样容易变形, 这种胶体称为溶胶;

②凝胶 如果胶粒间结合点很密, 尽管存在孔隙, 但胶体结构像固体一样是坚硬和刚性的, 这种胶体称为凝胶。 许多凝胶体的重要特性之一是具有很大的内比表面积, 如果凝胶体是多孔且可渗的, 其内表面具有很强的吸附能力。

土木工程材料中最重要的胶体是硬化硅酸盐水泥浆体, 当水泥与水混合时, 水泥颗粒

与水发生水化反应,溶胀并彼此结合在一起,形成高强而可渗的水化硅酸钙凝胶——C-S-H凝胶。另一个重要的胶体是沥青,沥青具有典型的溶胶和凝胶结构,容易产生塑性变形。

如果胶体中胶粒间结合力较弱,有力的搅拌就可以打破其相互间的结合,使胶体液化。停止搅拌时,胶粒间的结合又会逐渐形成,胶体变稠且恢复其初始状态,胶体的这种特性称为触变性。并不是所有胶体都有这种性质,如果有这种性质,那也是整个过程中的某个阶段才有。例如,虽然混凝土在早期凝结阶段具有很强的触变性,但硬化混凝土没有触变性,开裂后一般难以自愈。

建筑涂料和油漆是胶体触变性最常见的应用实例,搅拌使涂料或油漆液化,利于混合均匀;涂刷时,稍施加外力就使其很易扩展;一旦涂刷完成,就会凝结成不流淌的胶体,避免了在垂直面上的滴注。

(4) 物理状态的转变

物质物理状态的稳定性取决于一定的温度和压力条件,当这些条件发生改变时,物质的物理状态将发生转变——相变。例如,在 101.3 kPa(1 个标准大气压)压强下,温度降到 0 °C 以下时,液态的水可以转变为固态的冰,温度升高到 100 °C 以上时,液态的水又可转变为气态的水蒸气。物质的固态也存在不同的晶型,这些不同的晶型间也可随着条件的改变而发生晶相转变,例如,二氧化硅在常温下,以 α -石英存在,温度升高到 573 °C 以上时, α -石英转变为 β -石英。描述这种物理状态变化规律的是热力学相平衡图,如 P - V - T 图或 P - T 图等。图 1-1 是水的 P - T 相图。在平衡条件下,发生的相变是可逆的。如果将二氧化硅熔融体快速冷却使之来不及转变为晶体,就会形成玻璃体,这种转变称为不可逆相变。水泥熟料煅烧过程中,就采用快速冷却,使硅酸三钙发生不可逆相变,成为活性很高的固体矿物相。

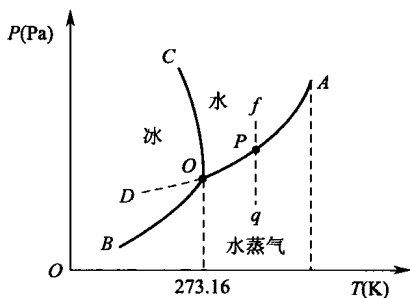


图 1-1 水的 P - T 相图

物质的相变将导致一些性能的变化,这对于工程应用有很重要的意义。例如,液态水转变为固态冰时,其体积膨胀 9%,从而导致混凝土受冻破坏。

1.1.2 材料的组成

金属材料的性能不同于陶瓷,而陶瓷的性能又不同于塑料,其根本原因是工程材料的组成不同。土木工程材料的组成包括化学组成和物相组成。

(1) 化学组成

化学组成是指材料中所含化学成分(元素、单质或化合物)的种类及其含量。例如,钢材所含的化学元素主要是 Fe 与 C,也含有微量的 Cr、Mn、Ni 等元素;生石灰的化学成分是 CaO,熟石灰的化学成分是 $\text{Ca}(\text{OH})_2$;硅酸盐水泥含有 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 等四种氧化物;聚氯乙烯塑料由聚氯乙烯(PVC)树脂($[\text{CH}-\text{CHCl}]_n$)、邻苯二甲酸二丁酯(增塑剂)和 CaCO_3 等化学成分组成。

(2) 物相组成

材料组成中物理和化学性质完全均匀的组分称为物相,在指定条件下各物相间有明显的界面,在界面上宏观性质发生跳跃式改变。气体混合中不论有多少种不同的气体,只有一个物相——气相;液体按其互溶程度可以有一相、两相或多相共存;一般一种固体便是一

个物相,因此,两种混合得非常均匀的固体粉末,仍含两个物相(但固体溶液除外,它是单相)。

材料的物相组成是指其所含物相(气相、液相或固相)的种类与含量,材料可以由单相组成,也可由多相组成。但大多数材料是由多相组成的。例如,单晶硅只有单相,而钢材和混凝土则是多相材料,而且混凝土不但有多种固相,还含有气相(孔隙)和液相(孔隙液)。

金属材料中,化学组成与结构相同且具有特定物理化学性能的晶体称为晶相,例如,钢材中主要有奥氏体、铁素体、渗碳体和珠光体等四种晶相,钢材所含晶相的种类与含量称为钢材的晶相组成。无机非金属材料中,化学组成与结构相同且具有特定物理化学性能的晶体称为矿物相,所含矿物相的种类与含量称为材料的矿物组成。例如,硅酸盐水泥中主要有硅酸三钙 C_3S 、硅酸二钙 C_2S 、铝酸三钙 C_3A 和铁铝酸四钙 C_4AF 等四种矿物相。

化学组成相同,其物相组成不一定相同,例如,按照相同化学组成配料的硅酸盐水泥生料,煅烧后得到的硅酸盐水泥熟料可能含有不同的矿物组成,因四种矿物相的相对含量还取决于煅烧条件与工艺。所以,选择工程材料时,其化学组成和矿物组成均要同时了解。

(3) 材料组成与性能的关系

材料组成对材料的各项性能均有很大影响,它们之间有如下规律:

- ①材料化学组成的微小差别就可引起材料性能很大或根本性改变;
- ②材料物相组成的变化就可导致材料发生质的突变。

例如,暴露在空气中的钢材一般容易锈蚀,但在钢材冶炼过程中,加入微量的铬或镍元素,就可使钢材永不生锈,称为不锈钢。再如在纯铁中加入少量碳元素,冶炼成钢,就可使强度不高且较柔软的纯铁变成高强且坚硬的钢,发生这种质的突变的主要原因是碳的加入导致钢材中晶相组成的改变。这些变化是通过化学机理实现的,即形成新的化合物或物相。组成的变化也可通过物理或物理化学机理,导致材料性能的明显变化。例如,在混凝土拌合物中添加少量的减水剂,可使干硬性的拌合物变成具有自流平特性的流态拌合物;铝是传热性很好的金属材料,如果在金属铝中引入气相形成泡沫铝,就可使之成为导热系数很低的绝热保温材料。所以,材料的性能与组成密切相关,在工程应用中需牢记两条基本原则:

①在选用材料时,必须详细了解材料的化学组成和物相组成,以确定是否满足工程应用要求;

②制备或加工材料或建材制品时,可以通过改变材料的组成来改善材料的性能,使之满足工程应用的要求,这是一条发明新材料和解决工程施工中技术难题的重要途径。

1.1.3 材料的结构

(1) 结构层次

材料的性能不但与材料组成密切相关,而且也取决于原子、化合物或物相结合在一起的方式和结合键——材料的结构。如果将组成材料的原子、化合物或物相看作质点,则材料的结构是指这些质点的空间结合(堆砌)方式和结合在一起所形成的形貌。根据分辨各种质点结合形貌特征的尺度大小(分辨率),可以将材料的结构分为微观结构、细观结构和宏观结构。

①微观结构 需用高倍电子显微镜分辨而用肉眼不能分辨的形貌特征属于微观结构,主要指材料中尺寸在 $10^{-10} \sim 10^{-6}$ m 范围的微小质点的结合方式和形貌特征。其中,尺寸为 $10^{-10} \sim 10^{-8}$ m 的原子或离子等质点的结合方式和形貌特征又称为原子结构。例如,石膏中

Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 离子与 H_2O 分子的结合方式,石膏晶体颗粒的几何形貌和堆积方式等属于微观结构范畴。

②细观结构 需用(光学)显微镜分辨的形貌特征属于细观结构,一般是化合物或物相等尺寸在 $10^{-6} \sim 10^{-3} \text{ m}$ 的细小质点的结合方式和形貌特征。例如,钢材中的晶相形貌、晶体颗粒结合方式和堆积形貌特征等属于细观结构范畴。

③宏观结构 用肉眼就能分辨的形貌特征和织构形态属于宏观结构,一般是指化合物或物相等尺寸在 10^{-3} m 以上的较大质点的几何形状、分布方式和形貌特征。例如,木材的年轮,混凝土中粗细骨料颗粒的几何形状和分布状况等属于宏观结构范畴。

原子结构主要影响材料的化学和物理性能,微观结构、细观结构和宏观结构同样影响这些性能,但后者对工程材料的力学性能和耐久性能影响较大。

(2) 结合键

为了了解材料的结构,必须知道材料中原子、化合物和物相间的结合键(力)。材料中各种质点或粒子之间的结合键主要有化学键和次价键。原子间的结合键均为化学键,化学键有离子键、共价键和金属键。分子间的结合键多为次价键,主要有范德华键和氢键。

(3) 固体材料的结构

原子可以通过一些不同的制备方法或工艺结合在一起成为聚集体,如凝聚、压制、化学反应、电极沉积和熔化等。熔化是形成原子聚集体的最常用制备工艺,如金属冶炼、陶瓷、玻璃与水泥的煅烧均是这种工艺。由于物态常常随着温度或压力而改变,当熔融体的温度冷却到一定时,液态的熔融体将转变为固体,在此转变过程中,会发生原子或质点的重排,形成具有不同微观结构的固体,固体材料的微观结构有晶体结构、无定形结构和晶体一无定形混合结构。

①晶体结构 晶体结构中质点(离子或离子基团、原子、分子)在三维空间内,按长程有序作点阵式周期性排列,即晶体结构可示意为:点阵+质点→晶体结构。具有代表性的基本结构单元(最小平行六面体)作为点阵的组成单元,称为晶胞,将晶胞作三维的重复堆砌就构成了空间点阵。一个平行六面体可由 3 个矢量和 3 个矢量间夹角,即 6 个参数表示,根据 6 个参数间的相互关系,全部空间点阵只有 14 种,归属于 7 个晶系,如表 1-1 所示。

表 1-1 晶体结构的晶系与点阵

晶系	三斜	单斜	正交	六方	菱方	四方	立方
点阵	简单三斜	简单单斜 底心单斜	简单正交 底心正交 体心正交 面心正交	简单六方	简单菱方	简单四方 体心四方	简单立方 体心立方 面心立方

自然界存在的和人工制造的固体,90%以上是晶体,如黏土、石灰石、砂、金属、碳(金刚石或石墨)、盐(NaCl 或 KCl)等。每种晶体均具有它特有的空间点阵结构,但不同种类的晶体(具有不同质点)可以具有同种类型的空间点阵结构。

根据晶体中质点间结合键的类型,晶体可分为离子晶体、共价晶体、金属晶体和分子晶体。

a. 质点以离子键结合所形成的晶体称为离子晶体,如 CaO 、 NaCl 等。

b. 质点以共价键结合所形成的晶体称为共价键晶体,如金刚石、 SiC 等。共价键晶体一般是绝缘体,光折射指数和吸收系数较大,熔点与硬度较高,脆性较大。

c. 由金属键结合金属原子所组成的晶体称为金属晶体,如 Fe、Al 等。金属晶体具有很高的电导率与热导率,较强的金属光泽,良好的延展性和不透明性,以及在酸性溶液中能够被 H 离子所置换等性质。

d. 以共价键型分子为质点,通过分子间作用力所形成的晶体称为分子晶体,惰性气体晶体是典型的分子晶体。分子晶体具有低熔点、低硬度、较大的膨胀系数和压缩率、较高的折射率与透明度、低导电率以及可溶于非极性溶剂等基本性质。

除具有单键型的晶体外,尚有许多晶体中包含有多键型和处于中间过渡态,特别明显地表现于离子键与共价键之间、金属键与共价键之间,属于这种键型的键均称为中间型键或混合键。例如,石墨晶体的层状结构,层内碳原子间是共价键与金属键之间的中间型键,层间以范德华键结合。

晶体中质点的周期性排列,使得晶体具有一些共同的性质:

- a. 均匀性。即晶体尺寸不同,而宏观性质相同;
- b. 各向异性。即在晶体中不同方向上具有不同的物理性质;
- c. 自限性。即晶体具有自发地形成规则几何外形的特性;
- d. 对称性。即晶体在某几个特定方向上的物理化学性质完全相同,并具有固定熔点等。

晶体材料可以是单晶体或多晶体,但绝大多数材料是多晶体,如钢材、岩石、陶瓷等。单晶体的内部质点是不间断地长程有序排列,具有规则的几何外形、固定的熔点、各向异性、稳定性好等特点;多晶体由许多取向不同而随机堆聚的小单晶体组成,或者说多晶体是由许许多多的晶粒所组成。晶粒间的分界面称为晶界面。多晶体具有 X 射线衍射效应,有固定的熔点,但不呈现各向异性。多晶体的物理性质不但取决于所包含的单晶晶粒的性质,而且晶粒的大小及其相互间的取向关系也起着重要作用。

② 无定形结构 无定形结构中质点短程排列有序(即一个质点在较小的范围内,与其邻近的几个质点保持着有序排列),而长程排列无序。具有无定形结构的固体称为无定形体,又称为玻璃体,如玻璃和大多数塑料,胶体也具有无定形结构。它们没有规则的几何外形,其物理性能在各个方向上是相同的,即各向同性。

如图 1-2 所示,有晶体结构的石英砂,其结构中硅氧四面体 SiO_4^{4-} 的质点按长程有序的周期性排列。当石英砂熔化成熔融体,快速冷却以避免其结晶时,就形成了无定形固体——石英玻璃,在石英玻璃结构中, SiO_4^{4-} 中 Si 与 O 原子是有序排列(近程有序)的,但 SiO_4^{4-} 的质点却是无序排列。

(4) 胶体材料的结构

胶体材料主要是无定形结构,即胶体中胶粒呈长程无序排列形成松散堆聚结构。当胶体中胶粒数量较少时,形成近似于液体的溶胶结构,其胶粒间的距离较大,溶剂接近于连续相,具有溶胶结构的胶体具有一定的流动性和黏滞性,如沥青材料;当胶粒数量较多时,胶粒相互堆积形成类似于玻璃体的凝胶结构,其胶粒堆聚构成连续网络结构,而溶剂分散填充在胶粒的间隙中。具有凝胶结构的胶体材料类似于固体,有较高的强度,较小的变形,但在长期荷载作用下,又可发生较小的黏性滑移或流动,如硬化硅酸盐水泥浆体、硬质聚氯乙烯塑料等。

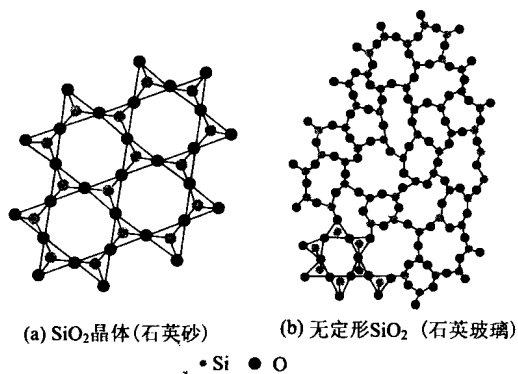


图 1-2 SiO_2 的晶体与无定形结构