

高等教育“十一五”国家级规划教材

# 土木工程材料

( 第三版 )

邓德华 主编

TUMU GONGCHENG CAILIAO

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

# 土木工程材料

(第三版)

邓德华 主编

中国铁道出版社

2017年·北京

## 内 容 简 介

本书以基本土木工程材料为主,共分10章,内容包括绪论、土木工程材料导论、无机胶凝材料、混凝土、砌筑材料、金属材料、木材、高分子材料、沥青及沥青基材料、纤维增强复合材料、建筑功能材料及附录。

本书适用于土木工程本科专业,也可用于土木建筑类其他专业,并可供土木工程设计、施工、科研等相关人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

土木工程材料/邓德华主编. —3版. —北京:中国铁道出版社,2017.8

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-113-23439-3

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(2017)第 181146 号

书 名: 土木工程材料(第三版)

作 者: 邓德华 主编

---

责任编辑: 陈美玲 李丽娟 编辑部电话: 010-51873240

封面设计: 王镜夷

责任校对: 王 杰

责任印制: 郭向伟

---

出版发行: 中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)

网 址: <http://www.tdpress.com>

印 刷: 三河市宏盛印务有限公司

版 次: 2004年8月第1版 2010年10月第2版 2017年8月第3版 2017年8月第1次印刷

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16 印张: 22 字数: 560 千

书 号: ISBN 978-7-113-23439-3

定 价: 45.00 元

---

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社读者服务部联系调换。电话:(010)51873174(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)51873659,路电(021)73659,传真(010)63549480

## 第三版前言

本教材是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,是普通高等学校土木工程本科专业的技术基础课教材,适用于土木工程学科各本科专业的教学。

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,其内容以《土木工程材料》(第二版)为基础,吸取了许多最新科技成果和近5年颁布现行的现行国家和行业标准、规范等新知识。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,介绍工程材料的组成、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,详述无机胶凝材料、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,介绍建筑防水材料、绝热材料、吸声材料等建筑功能材料的组成、构造和性能特点等基本知识。

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,让学生们通过学习,能基于工程设计和施工应用的要求,运用材料科学与技术的理论和概念,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。为学生毕业后从事土木工程领域中的科研与技术工作,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,也为土木工程学科各本科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。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),中南林业科技大学尹健(第8章),中南大学李建、石明霞(土木工程材料试验)。

在本教材的编写过程中,得到编者所在院校、中国铁道出版社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

2017年2月

## 第二版前言

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重要知识。

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	6
1.1 材料的组成与结构	6
1.2 材料的物理性质	12
1.3 材料的力学性质	20
1.4 材料的耐久性与安全性	25
习 题	28
第 2 章 无机胶凝材料	30
2.1 概 述	30
2.2 气硬性胶凝材料	30
2.3 通用硅酸盐水泥	39
2.4 特性硅酸盐水泥	59
2.5 硫铝酸盐水泥和铝酸盐水泥	61
习 题	67
第 3 章 混 凝 土	69
3.1 概 述	69
3.2 混凝土的组成材料与结构	70
3.3 新拌混凝土的性质	82
3.4 混凝土的早期行为与养护	87
3.5 混凝土的变形行为	89
3.6 混凝土的力学性能	94
3.7 混凝土耐久性	103
3.8 混凝土配合比设计	109
3.9 混凝土质量控制	117
3.10 高强高性能混凝土	118
3.11 其他混凝土	122

习 题	131
<b>第 4 章 砌筑材料</b>	134
4.1 砖与砌块	134
4.2 石 材	139
4.3 砌筑与抹面砂浆	144
习 题	152
<b>第 5 章 金属材料</b>	153
5.1 钢材的生产与种类	153
5.2 钢材的组成与结构	156
5.3 钢材的主要性质	159
5.4 钢材主要性能的影响因素	164
5.5 工程用钢材的种类与应用	168
5.6 钢材的锈蚀与防止	176
5.7 有色金属材料	178
习 题	180
<b>第 6 章 木 材</b>	182
6.1 木材的种类及结构	182
6.2 木材的性质	184
6.3 木材的防护处理	188
6.4 木材的应用	189
习 题	191
<b>第 7 章 高分子材料</b>	192
7.1 聚合物基本知识	192
7.2 塑 料	207
7.3 橡 胶	212
7.4 有机纤维	213
7.5 高分子胶黏剂	216
习 题	220
<b>第 8 章 沥青及沥青基材料</b>	221
8.1 石油沥青	221
8.2 煤 沥 青	227
8.3 石油沥青的改性	228
8.4 沥青混合料	232
习 题	248

第 9 章 纤维增强复合材料	249
9.1 概 述	249
9.2 钢纤维混凝土	251
9.3 非金属纤维水泥基复合材料	263
9.4 纤维增强塑料	270
习 题	279
第 10 章 建筑功能材料	280
10.1 防水材料	280
10.2 绝热材料	289
10.3 吸声材料	292
10.4 建筑装饰材料	294
习 题	301
附录 土木工程材料试验	302
F.1 试验一——水泥试验	302
F.2 试验二——骨料试验	308
F.3 试验三——混凝土拌合物试验	314
F.4 试验四——混凝土力学性能试验	318
F.5 试验五——混凝土耐久性试验	324
F.6 试验六——建筑钢材试验	335
F.7 试验七——石油沥青试验	339
F.8 试验八——沥青混合料马歇尔稳定度试验	341
参考文献	344



# 绪 论

## 0.1 土木工程与土木工程材料

土木工程(Civil Engineering)是建造各类工程设施的科学技术的统称,是应用各类科学与技术知识,研究、设计、建造和维护各种工程设施的一级学科。它既指所应用的材料、设备和所进行的勘测、设计、施工、保养维修等技术活动;也指工程建设的对象,即建造在地上或地下、陆上或水中,直接或间接为人类生活、生产、军事、科研服务的各类工程设施。

土木工程材料(Civil Engineering Materials)既是土木工程一级学科下的二级学科名称,也是建造各类工程设施所用各种工程材料及其制品的总称(也称建筑材料)(Construction Materials 或 Building Materials),还是高校土木工程类专业的一门专业基础课的名称。

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,它从土木工程技术与应用要求出发,运用材料科学知识,研究各种工程材料及其制品的组成、结构、性能及其相互关系;制备方法与施工工艺对工程材料与制品的物相组成、结构和性能的影响等基本原理;以及工程材料的应用技术、环境行为与服役性能、性能检验与评价方法等。

材料是各领域科技进步的核心。土木工程材料作为建造工程设施的物质基础,推动了土木工程的发展和科技进步,两者相互促进,协调发展。土木工程领域中提出的新问题,刺激了新材料及其技术与方法的创造和发明;每当出现新型和优良土木工程材料时,土木工程就会有飞跃式的发展和技术变革。

人类在早期只能采用泥土、木料及其他天然材料从事营造活动,建造简陋的住所;中国在公元前 11 世纪制造出瓦,公元前 7 世纪开始烧制和使用石灰;公元前 5 世纪烧制出黏土砖。这些人工建筑材料——砖瓦的出现,最早的胶凝材料——石灰的应用,使人类第一次冲破了天然材料的束缚,开始广泛地、大量地修建房屋和城防工程等设施。由此土木工程技术得到了第一次飞跃发展,创立了砌体结构及其建造技术。建造了一批宏伟的砌体结构构筑物,如我国的万里长城、赵州桥、大雁塔等。此后,长达 2000 多年时间里,砖和瓦一直是土木工程的重要建筑材料,甚至在目前还被广泛采用,为人类文明做出了伟大贡献。

钢材的制造与大量应用使土木工程发生第二次飞跃发展。17 世纪 70 年代开始使用生铁,19 世纪初开始使用熟铁建造桥梁和房屋,这是钢结构出现的前奏。19 世纪中叶开始,冶炼并轧制出抗拉强度很高、延性好的建筑钢材,随后又生产出高强度钢丝、钢索,使钢结构蓬勃发展。与此同时,为适应钢结构工程发展的需要,在牛顿力学的基础上,材料力学、结构力学、工程结构设计理论等应运而生。施工机械、施工技术和施工组织设计的理论也随之发展,土木工程从经验上升为科学,在工程实践和理论方面都面貌一新,从而促成了土木工程更迅速的发展。除原有的梁、拱结构外,新兴的桁架、框架、网架结构、悬索结构逐渐推广,出现了结构形式百花争艳的局面。建筑物跨径从砖、石结构与木结构的几米、几十米发展到钢结构的几百米,直到现代的千米以上。于是在大江、海峡上架起大桥,在地面上建造起摩天大楼和高耸铁塔,在地面下铺设铁路,创造出前所未有的奇迹。

19世纪20年代,硅酸盐(波特兰)水泥的发明,导致混凝土问世。19世纪中叶以后,出现了钢筋混凝土这种新型的复合建筑材料,其中钢筋承受拉力,混凝土承受压力,发挥各自的优点,使钢筋混凝土广泛应用于土木工程的各个领域。20世纪30年代,出现了预应力混凝土。预应力混凝土结构的抗裂性能、刚度和承载能力,大大高于钢筋混凝土结构,因而用途更为广泛。从此,土木工程进入了钢筋混凝土和预应力混凝土占统治地位的历史时期,给建筑物和工程设施带来了新的经济、美观的工程结构形式,使土木工程产生了新的施工技术和工程结构设计理论。这是土木工程的又一次飞跃发展。

20世纪40年代后,以高分子材料为主的化学建材异军突起,不但涌现了大量轻质高强的建筑塑料及其复合材料,一些具有特殊功能或智能的材料制品如绝热材料,吸声隔音材料,耐火防火材料,防水抗渗材料,防爆防辐射材料也应运而生;混凝土化学外加剂及其技术的发明和应用,使混凝土材料的强度和耐久性显著提高。20世纪90年代,高性能和具有特殊功能的混凝土材料以及高强钢材的出现,为高层建筑、大跨度桥梁、高速公路与铁路、水利枢纽等大型工程设施的建造提供了高性能土木工程材料,还为更加舒适、节能、低耗的房屋建筑提供了强有力的物质保障。

## 0.2 土木工程材料的种类与发展

### 0.2.1 分类

土木工程材料的种类繁多,其性能和功能各异。从广义概念来说,几乎所有天然和人造物质均可作为土木工程材料,用于工程设施的建造;从狭义角度来说,泥土、石材、木材、砖瓦、胶凝材料、砂浆与混凝土、钢材、高分子材料与沥青等是基本土木工程材料。

土木工程材料有天然材料和人造材料,其类别可按表0.1划分。从土木工程应用的角度,通常分为以下几类。

- ①胶凝材料 硅酸盐水泥、铝酸盐水泥、硫铝酸盐水泥、石灰和石膏等。
- ②砌体材料 岩石、砖、砌块、砂浆等。
- ③钢材 低碳钢、低合金钢、优质碳素钢和各种型钢与钢筋。
- ④混凝土 普通混凝土、高强与高性能混凝土、轻混凝土等。
- ⑤木材 原木、方木、胶合型材和板材。
- ⑥道路路面材料 道路混凝土、沥青混合料、塑胶地面材料和各种花格砖等。
- ⑦建筑功能材料 防水材料、绝热材料、吸声材料、装饰材料和防腐材料等。

表 0.1 土木工程材料的种类

类 别	种 类
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
无机非金属材料	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、胶粘剂、合成橡胶、合成纤维及其织物等

续上表

类 别	种 类
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,未来发展趋势主要表现在以下几方面:

- (1)高性能或超高性能化 如结构材料的强度和耐久性不断提高,功能材料性能不断提升等。
- (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无污染、对人们健康无害等。

## 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和试验,检验包括外观考察、尺寸测量、称重、用锤子敲击、用指甲或小刀划痕以及其他基本操作;试验是将一些外部因素(如荷载与环境)施加于材料,测量材料的物理力学和耐久性能,如强度试验、耐久性试验等。

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,以提高和改善其质量。
- (3)研究与开发 通过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能在短时间内得出结果。试验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、低成本试验被广泛用于工程材料验收和质量控制中。

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、建造和维护的技术活动中,经常遇到土木工程材料的选择问题,而且总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合理的选择程序。

任何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工程要求的性能与使用寿命、允许的成本和维护费用的综合分析;
- ②根据工程要求,对材料或制品进行比较;
- ③工程材料物理状态、保存方法和施工方法的选择或设计。

## 0.4 本课程的性质与学习内容

作为高校土木工程专业的一门专业基础课,本课程具有鲜明的工程特点和实用性,注重材料科学知识与土木工程技术及实践的紧密结合。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。历史和大量工程实践已证明:工程质量的优劣和工程设施能否在使用条件下长期发挥其良好的功能,在很大程度上取决于正确地选择和使用土木工程材料。在满足相同技术性能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重要影响。因此,为了更好地选择和使用各种土木工程材料,各类土木工程或基础设施的设计者、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。不懂得土木工程材料的“来龙去脉”,就不可能成为一个合格的土木工程师!

土木工程专业的学生在校期间,将主要通过本课程的学习与实践训练,掌握上述知识和应用技能,为后续专业课程的学习和毕业设计提供土木工程材料的基础知识和技能训练,并帮助学生在毕业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、正确选择设计参数与施工工艺,以及在材料试验与验收、质量鉴定、储存运输和试验研究等方面打下必要的基础。

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内的最新科技成果,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。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);建筑功能材料(第10章)。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在方法,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途径。

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,掌握针对工程的实际条件和要求,正确选择材料的方法和技能。

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有:

- ①选取有代表性的样品作为试样或按照规定制备试件;
- ②选择合适的试验仪器设备;
- ③按照规定或自行设计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,撰写试验报告。

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。

各类建筑物和铁路、公路、桥梁、隧道、水坝、港口等工程设施均由土木工程材料构筑而成。为使建筑物和工程设施具有期望的功能、安全性和服役寿命,土木工程材料的施工、物理、力学和耐久等基本性能应满足工程设计与施工要求,这些性能包括以下几点:

- 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 如外观、密度、表面特性和热学、电学、声学、光学等性能;
- ③力学性能 如强度、刚度、韧性、脆性、弹性、塑性、硬度、冲击、疲劳等;
- ④耐久性能 如抗渗性、抗水性、抗冻性、耐热性、抗化学腐蚀性、耐老化性等。

土木工程材料的各项性能均与其组成、状态、结构或构造密切相关,并受材料制备和施工工艺与条件的影响。为使土木工程类专业的学生更好地学习和掌握各种土木工程材料的知识和技能,本章主要介绍材料的组成、状态、结构、构造和材料的各项性能等基本概念,以及它们相互之间的关系,为后续各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

所有物质均可用作工程材料,因而,工程材料可以是气体、液体或固体。气体和液体(包括溶液、悬浊液)又称为流体,而绝大多数工程材料为固体。此外,有些材料是由流体和固体混合组成的多相分散体——胶体,如气—固溶胶、液—固凝胶等。

#### 1. 流体及其特性

气体中分子相互间距离很大,并处于不断的无规自由运动中。因此,气体具有如下特点:

- ①密度小,黏度小,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自发地相互扩散、混合成单一物相。

利用气体的这些特点,可制成充气屋顶、充气橡胶坝和固体泡沫材料等。

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、混合成均相,不相容的液体各自分离而呈多相。

流体具有流动性,在外加剪切力作用下流体可产生不可逆剪切变形——流动。对于理想流体,其剪切变形速率  $dy/dt$  与外加剪切应力  $\tau$  成正比:

$$\frac{dy}{dt} = \beta\tau \quad \text{或} \quad \tau = \eta \frac{dy}{dt} \quad (1.1)$$

式中, $\beta$ 为流动度; $\eta$ 为动力黏度系数,简称为黏度或稠度,单位是  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。可以看到, $\beta$ 与 $\eta$ 互



为倒数,表明流体的黏度越大,流速(剪切变形速率)越小。

流体的黏度随密度或浓度增加而增大,随温度升高而显著减小。例如,20℃时,空气的黏度  $\eta \approx 1.8 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ,水的黏度  $\eta \approx 1.5 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。

大多数流体是非理想流体,其流变行为不遵循公式(1.1)。已提出多个公式表征非理想流体的流变行为,例如,研究表明,新拌水泥浆、混凝土拌合物、建筑涂料等悬浊浆体的流变行为遵循宾汉姆公式(1.2),这种流体又称为宾汉姆流体。

$$\tau = \tau_0 + \eta \frac{d\gamma}{dt} \quad (1.2)$$

式中, $\tau_0$ 称为剪切屈服应力,单位为Pa。只有当剪切应力大于屈服应力时,宾汉姆流体才会流动,流动后的流变行为又与理想流体相似。

有些非理想流体具有触变性,即流体受到剪切时,黏度变小且可流动,停止剪切时,黏度还原;或受到剪切时,黏度变大,停止剪切时,黏度还原。建筑涂料和油漆是流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,施加外力可使其铺展成膜层;一旦涂刷完成,就会凝结成不流淌的涂层,避免了垂直面上涂层的滴注或纹理。

## 2. 固体及其特性

固体有固定的体积和形状,且质地较坚硬,可承受外力作用。与流体相比,固体中的粒子(原子、离子、分子或晶粒)结合紧密,外力作用下产生的变形较小。绝大部分工程材料是由一种或多种晶体或非晶体颗粒组成的聚集体,颗粒间存在界面,聚集体内含有孔隙或空隙。

原子、分子或离子等粒子可在固体材料中扩散,扩散是在浓度梯度、电场等驱动下粒子的定向迁移运动。例如,在浓度梯度驱动下,粒子以稳态或非稳态方式由浓度较高的区域向浓度较低的区域自发迁移,稳态或非稳态扩散可用菲克第一或第二定律分别描述。

菲克第一定律: 
$$J = -D \frac{dC}{dx} \quad (1.3)$$

菲克第二定律: 
$$J = -D \frac{d^2C}{dx^2} \quad (1.4)$$

式中, $J$ 为浓度梯度方向( $x$ )上单位时间内通过单位横截面积上的粒子数,即流量;亦即,扩散速率与浓度梯度  $dC/dx$  或  $d^2C/dx^2$  成正比,其比例系数  $D$  称为扩散系数。扩散系数是固体材料的本征性能,一般来说,材料的密实度越高,扩散系数越小,扩散速率越慢。此外,扩散速率随温度升高而呈指数函数增加。

扩散现象及其规律有重要的实际意义,例如,分别用菲克第一和第二定律来描述大气中的  $\text{CO}_2$  气体和海水中  $\text{Cl}^-$  离子在混凝土中的扩散规律,预测钢筋混凝土的耐久性。还可利用扩散对材料进行加工和改性,如钢材表面渗碳以提高其表面硬度等。

## 3. 胶体及其特性

胶体(又称胶状分散体)是一种由两种不同状态的物质构成的混合物,其中,一种为分散质,一般是微小的粒子或液滴;另一种为分散介质。胶体是分散质粒径(直径  $< 1 \mu\text{m}$ )介于粗分散体系和溶液之间的一类高度分散的多相分散体系。胶体属于介稳体系,在一定条件下能稳定存在,其稳定性介于溶液和悬浊液之间。胶体能发生聚沉、电泳、渗析和丁达尔现象等。胶体可以是黏稠性流体,也可是半刚性或刚性固体,这取决于分散质浓度和胶粒间结合力。

土木工程材料中,重要的凝胶有硅酸盐水泥水化形成的水化硅酸钙——C-S-H凝胶、玻璃、沥青、密封胶和塑料等。

#### 4. 物理状态的转变

物质的物理状态是一定的温度和压力下的平衡态,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,也称常压)压强下,温度降到 0 °C 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。有多种晶型的晶态物质,也可因条件改变而发生不同晶型间的相变。例如,常温常压下, $\text{SiO}_2$  以  $\alpha$ -石英存在,温度升高到 573 °C 以上时, $\alpha$ -石英转变为  $\beta$ -石英。

一般采用热力学相平衡图描述物质的相变规律,如  $P$ - $V$ - $T$  图或  $P$ - $T$  图等。图 1.1 是水的  $P$ - $T$  相图。可逆相变一般发生在平衡条件下,破坏平衡条件,可阻止可逆相变。如将  $\text{SiO}_2$  高温熔融体快速冷却到相变温度以下,就会“冻结”成玻璃体。水泥熟料煅烧过程中,采用快速冷却法阻止硅酸三钙向硅酸二钙的相转变。

相变可导致物质体积的变化,并产生热效应,这对于工程应用有重要意义。例如,液态水转变为固态冰时,其体积膨胀 9%,可导致混凝土受冻破坏。

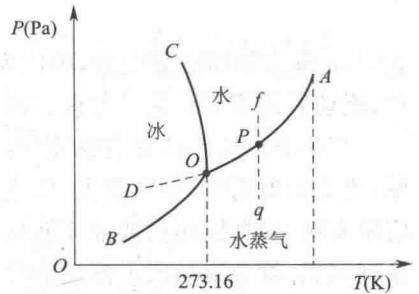


图 1.1 水的  $P$ - $T$  相图

### 1.1.2 材料的组成

土木工程材料的组成包括化学组成和物相组成,它们对材料性能有重大影响。

#### 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,钢材的组成元素主要是 Fe 与 C,以及微量的 Cr、Mn、Ni 等合金元素;生石灰的化学成分是 CaO,熟石灰的化学成分是  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ;硅酸盐水泥的主要化学成分是 CaO、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  等 4 种氧化物;聚氯乙烯(PVC)塑料由 PVC 树脂( $[-\text{CH}_2-\text{CHCl}-]_n$ )、邻苯二甲酸二丁酯(增塑剂)和  $\text{CaCO}_3$ (填料)等化学成分组成。

#### 2. 物相组成

材料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突变。气体混合物无论含多少种不同气体,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;通常一种固体便是一个物相,因此,即使两种微细固体粉末混合得非常均匀,该混合物仍含两个物相(但固体溶液是单相)。

物相组成是指材料所含物相的种类与含量。材料可以由单相组成,也可由多物相组成。但大多数材料是由多物相组成的。例如,单晶硅是单相材料,河砂是多物相材料。

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金相,例如,钢材中主要有奥氏体、铁素体、渗碳体和珠光体等金相,钢材所含金相的种类与含量称为钢材的金相组成。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无机非金属材料的矿物组成。例如,硅酸盐水泥熟料主要含硅酸三钙  $\text{C}_3\text{S}$ 、硅酸二钙  $\text{C}_2\text{S}$ 、铝酸三钙  $\text{C}_3\text{A}$  和铁铝酸四钙  $\text{C}_4\text{AF}$  等 4 种矿物相。

材料的化学组成相同,但其物相组成不一定相同。材料制备过程中,其化学组成取决于原材料的组成与配比,而物相组成主要取决于加工工艺和制备方法。例如,按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 4 种矿物相的相对含量还取决于煅烧温度与工艺。



### 3. 材料组成与性能的关系

材料的各项性能与其组成是紧密关联的,它们之间一般有如下规律:

- ①材料化学组成的微小差别可使材料性能发生很大或根本性差异。
- ②材料物相组成的变化可导致材料发生质的突变。

例如,暴露在空气中的碳素钢一般容易锈蚀,但在钢材冶炼过程中,加入微量的铬或镍元素,可使钢材永不生锈,成为不锈钢。再如在纯铁中,加入质量浓度为0.02%的碳元素,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,因加入的碳改变了钢材的金相组成。

组成的变化既可通过化学机理,也可通过物理或物理化学机理,使材料性能发生显著变化。例如,在混凝土拌合物中掺加少量减水剂,可使干硬性拌合物变成具有自流平特性的高流态拌合物。铝是传热性很好的金属材料,如果在金属铝中引入气泡制成泡沫铝,可制成导热系数很小的绝热保温材料。因此,在开发和使用材料时,需掌握两条基本原则:

- ①在选用材料时,必须了解材料的化学和物相组成,以便掌握其基本性能。
- ②制备或加工材料和建材制品时,可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,这是开发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. 结构的尺度级别

材料的性能不但与组成密切相关,而且取决于不同尺度(分辨率)的结构形式。如果将组成材料的原子、化合物或物相等粒子视为质点,则材料的结构是指这些质点的空间结合(堆砌)方式、结合键类型和形貌。根据分辨的尺度,材料的结构分为微观、细观和宏观结构。

(1)微观结构 指材料中尺度为 $10^{-10} \sim 10^{-6} \text{m}$ 的微小质点的结合方式和形貌特征,需用高倍电子显微镜分辨。其中,尺度为 $10^{-10} \sim 10^{-8} \text{m}$ 的微观结构又称为原子尺度结构,包括原子及原子间键合类型和原子的堆垛方式。例如,石膏中 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 离子与 $\text{H}_2\text{O}$ 分子的结合方式、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 指材料中尺度为 $10^{-6} \sim 10^{-3} \text{m}$ 的细小质点的结合方式和形貌特征,需用(光学)显微镜分辨,又称显微尺度结构。例如,钢材中的金相形貌、晶体颗粒堆积方式等属于细观结构范畴。

(3)宏观结构 指材料中尺度在 $10^{-3} \text{m}$ 以上的较大质点的几何形状、分布方式和形貌特征,一般用肉眼就能分辨,又称宏观尺度结构。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。

材料的各尺度级别的结构以不同的方式控制着材料的各项工程性能。

#### 2. 结合键类型

材料中各种原子、分子或粒子之间的结合键主要有化学键和次价键,原子间主要由化学键结合,化学键有离子键、共价键和金属键;分子间通常以次价键结合,主要有范德华键和氢键等。键的特性决定了材料的物理、力学及化学方面的特性,包括给定条件下的物理状态和结构。例如,用锤子敲击钢材和陶瓷,金属中原子以金属键结合,电子不局限于某一原子,原子可相对滑动,钢材以较大变形响应,表现为塑性;陶瓷中原子主要以离子键或共价键结合,离子或原子团的相对滑动位移很小,锤击下陶瓷以断裂作为响应,表现为脆性。

#### 3. 固体材料的微观结构