

混凝土微观结构、性能和材料

Concrete: Microstructure, Properties, and Materials

(原著第四版)

[美] P·库马尔·梅塔 保罗·J·M·蒙蒂罗 著

欧阳东 译



中国建筑工业出版社

混凝土微观结构、性能和材料

(原著第四版)

[美] P·库马尔·梅塔 保罗·J·M·蒙蒂罗 著
欧阳东 译

中国建筑工业出版社

著作权合同登记图字：01-2014-1122号

图书在版编目(CIP)数据

混凝土微观结构、性能和材料(原著第四版)/(美)梅塔,蒙蒂罗著;欧阳东译. —北京:中国建筑工业出版社,2016.5

ISBN 978-7-112-19103-1

I. ①混… II. ①梅…②蒙…③欧… III. ①混凝土-研究 IV. ①TU528

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第033927号

Concrete: Microstructure, Properties, and Materials / P. Kumar Mehta
Copyright ©2014, 2006 by McGraw-Hill Education.
All rights reserved.

The authorized Chinese translation edition is jointly published by McGraw-Hill Education (Asia) and **China Architecture & Building Press**. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only, excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan.

Copyright©translation 2016 by McGraw-Hill Education (Asia) and China Architecture & Building Press.

本书由美国麦格劳-希尔图书出版公司正式授权我社翻译、出版、发行
本书中文简体字版。

责任编辑:王梅 程素荣 李天虹

责任设计:李志立

责任校对:陈晶晶 李欣慰

混凝土微观结构、性能和材料

(原著第四版)

[美]P·库马尔·梅塔 保罗·J·M·蒙蒂罗 著
欧阳东 译

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京君升印刷有限公司印刷

*

开本:787×1092毫米 1/16 印张:34½ 字数:861千字

2016年10月第一版 2016年10月第一次印刷

定价:99.00元

ISBN 978-7-112-19103-1

(28407)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题,可寄本社退换

(邮政编码 100037)

内 容 提 要

本书是加州大学伯克利分校梅塔和蒙蒂罗教授所著的、享誉世界的混凝土专业教科书最新版本。全书分三大部分。第一部分论述硬化混凝土的微观结构和性能，如强度、弹性模量、干缩、温度收缩、徐变、拉应变、渗透性以及各种劣化过程的耐久性，各个性质的定义、重要性、起源以及影响因素。第二部分是关于混凝土的配制原料和混凝土的制备加工，对水泥、骨料、外加剂的成分和性质分章进行了阐述，还分章详细介绍了美国 ACI 混凝土配比设计方法、混凝土早期性能以及混凝土无损检测方法。第三部分包含了一些重要技术专题，如高强高性能混凝土、自密实混凝土、透水混凝土、再生混凝土以及全球变暖和可持续发展时代的混凝土问题等。

全书由欧阳东教授一人翻译，较好地保持了译本行文风格的统一以及减少了差错。译者还对当前混凝土科学技术领域的若干重要热点问题做了较详细的译注和较深入的讨论。本书系统性强，叙述深入浅出，不仅适合土木、材料、建筑、力学、化工等相关专业的本科学生学习，而且全书强调和凸显了结构-性能的关系，对混凝土各种现象做出了深入而令人信服的机理分析，非常适合各层次研究生以及科研人员和工程技术人员阅读参考。

作者介绍

P·库马尔·梅塔 国际混凝土研究泰斗。博士，加州大学伯克利分校土木与环境工程系荣休教授。伯克利奖 (Berkeley Citation) (对加州大学伯克利分校以及个人专业研究领域所作贡献的最高荣誉奖) 获得者。梅塔教授也是美国混凝土学会 (American Concrete Institute) 荣誉会士。他作为作者或共同作者，在混凝土技术领域出版了 4 部著作，发表了大量的专业论文。

保罗·J·M·蒙蒂罗 国际混凝土研究领军科学家。博士，加州大学伯克利分校土木与环境工程系 Roy W. Carlson 讲席教授；劳伦斯伯克利国家实验室 (Lawrence Berkeley National Laboratory) 材料科学部科学家。蒙蒂罗教授作为作者或共同作者，发表了超过 190 篇的期刊论文以及大量会议论文和报告。

译者介绍

欧阳东 教授、博士生导师，国务院政府特殊津贴专家。暨南大学工程材料与结构耐久性研究中心主任。麻省理工学院材料系研究科学家、访问教授。广东省首位水泥混凝土工学博士，长期从事水泥混凝土材料与结构的研究，曾创下我国超高强混凝土超高程泵送全国纪录。2012 年 10 月至 2013 年 11 月在加州大学伯克利分校土木系梅塔和蒙蒂罗两位教授 (本书作者) 课题组开展合作研究。

——谨以此书献给混凝土材料、结构和施工共同体中的学生、科研人员以及从事实际工作的工程师们。他们面对挑战，开疆拓界，扩展混凝土材料在人类文明中的应用，并使之更耐久、更可持续以及对环境更加友好。

译序

混凝土作为世界上最大宗的人造材料，它的制备和应用都对地球的自然环境和人文社会环境产生了深刻而持久的影响。正因为如此，越来越多的大学和研究机构以及土木建筑类和材料类专业的学生，投身到混凝土的研究之中。混凝土看似简单，实则不然。事实上，与许多材料相比，混凝土的组成和微观结构更加复杂，大多数情形下不能当作匀质材料处理，从而很难将其纳入材料科学的轨道去解决问题；而且混凝土的微观结构和各种性能还是时间的函数，一直处于变化之中。要深入认识和研究混凝土，涉及众多的学科，从化学、物理化学到晶体结构学、硅酸盐物理化学、水泥化学，到热力学、材料力学、细观力学、多孔介质弹性力学、原子分子模拟，等等。要找到一本能有效帮助读者系统建立起水泥混凝土坚实牢固知识体系的综合性教材十分不易。

梅塔和蒙蒂罗两位教授在加州大学伯克利分校土木系任教。作为国际混凝土研究的泰斗，他们的科研和教学经验极为丰富，两人合著的《混凝土微观结构、性能和材料》正是这样一部十分适合帮助读者构建混凝土专业知识体系的深入浅出的教科书，它将多学科的知识熔于一炉，打通了混凝土材料、混凝土工艺、混凝土力学三大内容的联系，特别是他们在混凝土还不能完全纳入材料科学轨道的情况下，在全书强调和突显了结构-性能的关系，对材料各种现象做出了深入而让人信服的机理分析，这使得这本专著远远超越绝大多数混凝土教材而成为全世界众多大学土木类专业和无机非金属材料类专业必备的教科书。我国同济大学祝永年等教授以及清华大学覃维祖教授等都分别翻译过这部著作的不同版本。在译者本人的硕士和博士学习研究阶段，这本著作一直放在工作的案头，是我最喜欢和最重要的参考书之一。当年梅塔教授所说的那句“凡是抽象的都不是混凝土”的名言，至今仍深深刻印在脑海中，潜移默化影响着我的研究工作。

机缘巧合，2012年年底到2014年年底，我有机会作为访问学者和访问科学家在加州大学伯克利分校土木系和麻省理工学院材料系从事科学研究。在伯克利的一年多时间里，在蒙蒂罗和梅塔两位教授的课题组开展合作研究，得到了他们的悉心指导，度过了非常愉快的时光。那时，他们刚刚对这本著作进行了全新改版并提交给了出版社。受作者和出版社 McGraw-Hill Education 的委托，我将这部著作第四版的中文翻译工作承担了起来。新版著作全面修订了书的各个章节，增加了很多前沿创新内容，特别是讨论了混凝土对环境的冲击以及全球变暖和可持续发展时代混凝土共同体（包括材料、结构和施工）应有的对策，全书突出了绿色环保和可持续发展的主题。在书中，两位教授不仅高屋建瓴地提出了整体论思想以替代行业盛行的还原论思维，并且贴近现实提出了混凝土今后发展的指导原则：“在这个新的时代里，混凝土的耐久性和可持续性比高早强和建设的高速度重要得多”，“从长远来看，对任何材料，减轻环境冲击的办法都是降低材料的消耗速度”，“为寻

求混凝土行业可持续性发展的整体方案，我们必须践行工业生态学”。这些关于混凝土可持续发展的先进理念和思路，十分值得我们深思和借鉴。中国 2015 年水泥产量已经超过 23 亿吨，占世界水泥产量的 50% 以上，而商品混凝土产量超过了 40 亿吨。中国近三年的水泥或混凝土消耗量，相当于美国 20 世纪整整一个世纪水泥或混凝土的用量。混凝土作为一种高环境代价和高资源代价的材料，每生产 1t 熟料约排放 1tCO₂（全球每年因水泥生产而排放的 CO₂ 占了全球人类排放 CO₂ 的 7%，而中国每年水泥生产排放的 CO₂ 占了全国排放 CO₂ 的 10%），开采粗骨料、细骨料以及石灰石原料还可能损害青山绿水——中国工程界该像爱惜水资源一样爱惜使用混凝土了。应该树立混凝土资源利用效率的观念，从总体上再进一步提高我国混凝土的强度水平和耐久性以节约混凝土。中国工程界在连年创造混凝土施工建设的高速度之后，也需要思考和践行“慢工出细活”的朴素哲理了，经久耐用就是最大的节约。当然，在混凝土可持续发展的道路上，我们也无需事事唯欧美马首是瞻。中国熟料产量和各种工业副产品以及建筑废弃物数量巨大，实施“工业生态学”的基础和资源条件远远胜于美国和欧盟各国。我们应该有信心有能力发展出适合国情的、具有世界先进水平的“中国水泥混凝土工业生态学”。当前，我国在 32.5 等级水泥的去留废存以及工业废弃物的应用模式（用于水泥工业还是混凝土工业）等问题上仍争论不休，我想重要的还是要加快对各种工业副产品的研究、改性和开发，尽快形成商品化和标准化的掺合料产品，深入研究这些产品的需水（或减水）特性，详细测定和建立每一产品在各种条件下的活度系数曲线（影响系数曲线），使工业副产品掺合料不仅发展成为现代混凝土必备的一个组分，而且发展成为现代混凝土中使用方便、掺量适度较大的一个组分，以大大减少我国的熟料生产和消耗量。

作为一种传统材料，混凝土已经深入到我们生活的方方面面。正如两位混凝土泰斗在本书献词所说的，现代混凝土发明以来的近 200 年时间里，“混凝土材料、结构和施工共同体中的科学家和工程师们面对挑战，开疆拓界，扩展混凝土材料在人类文明的应用”。他们的工作，使混凝土在很大程度上支撑起地球这个星球的物质文明。如今，这些雄心勃勃、目光远大的科学家和工程师们，还把眼光投向了更加辽远壮阔的太空，探索着混凝土（包括全新概念的混凝土）在人类移民其它星球计划中可能发挥的作用。挑战和创新是永无止境的，如果本书中文版的出版，能对混凝土共同体中的我国同行有所裨益，特别是能激起年轻一代的学生学习和创新混凝土的热情，那译者翻译出版这本书的目的也就实现了。

翻译是一件细致繁琐、需要专注和耐心的工作。在近两年时间里，我将大部分的时光消磨在这件事情上。这项工作固然有艰苦和枯燥的一面，但于我亦有不少乐趣，书中涉及的不少人和事是自己熟悉和了解的，翻译的过程有时就好像是与保罗等师友聊天交流一样。这版新书之所以由我一人独自翻译，主要是为了保持译本行文和风格的一致以及尽可能减少差错。名师大作，翻译自然不敢有丝毫懈怠。不过此书体系庞大、涉及学科众多，虽已尽己之力，但仍恐错漏繁多。不妥之处，希望读者予以批评指正（有关此译本的任何意见，请通过邮箱 touyangdong@gmail.com 或电话 18666099363 发送至欧阳东）。翻译过程中，学生庄诗雨、谭雪飞、卫明白、杨岳霖、费帆、张浩、瞿凯、林浩峰做了不少图表整理和实验验证工作，博士生鲁刘磊、林艳丽、温喜廉以及以前的学生黄华县、范圆圆、徐畏婷也参与了其中一些工作，特此说明。

欧阳东

序

这是一本出色的专著和教科书。作者梅塔教授和蒙蒂罗教授是在混凝土微纳米结构、水泥化学、混凝土工艺学、混凝土力学等研究领域作出了巨大和持久贡献的领军科学家。在杰出的学术生涯之外，他们还承担了现实世界富有挑战的工程项目的顾问工作。他们在书中给出的直观感性的工程案例将激发工程师们为混凝土材料和结构寻找出更富有创造性和可持续性的解决方案。本书通俗易懂，直观明了，深受学生和专业人士的欢迎。前三版已经被翻译成日文、中文、希腊文、西班牙文、葡萄牙文和波斯语，是一部享誉世界的专业教科书。

在第四版里，作者对每一章都进行了仔细的修订或重写，吸收了领域内的最新发展成果，包括世界范围最新的建设工程项目、缩减剂、自密实混凝土、喷射混凝土、渗透混凝土、内养护、混凝土层析成像技术以及其他前沿技术。本书的一个显著特色，就是在混凝土材料、混凝土工艺、混凝土力学三大内容之间实现了融会贯通。在新版本的混凝土力学一章中，包括了具有开创性的用于描述冰点混凝土的多孔介质力学理论和公式、混凝土纳米力学的尺度分析以及关于混凝土碱骨料反应模型的有见地的评述。

作者在书中对全球混凝土产业所造成的环境冲击进行了深刻的分析。据他们估计，在2010年，全球生产了330亿吨混凝土，将近消耗了37亿吨波特兰水泥熟料和270亿吨骨料以及27亿吨的拌合水和一定量的化学外加剂。混凝土生产涉及数量巨大的物料的开采、加工和运输，需要耗费大量的能源，对未开垦地的生态造成不利的影响。另外，全世界每年水泥生产（大多为波特兰水泥）所排放的CO₂将近占了全球人类活动引起的CO₂排放量的7%。为此，梅塔教授和蒙蒂罗教授给出了发展绿色混凝土可靠的指导原则，即在混凝土中使用大掺量的辅助胶凝材料，特别是粉煤灰或水淬高炉矿渣。本书第8章充分论述了化学外加剂和矿物外加剂，第12章论述了绿色高性能混凝土的应用和发展。在本书最后一章，梅塔教授和蒙蒂罗教授对全球变暖时代的混凝土及其可持续性进行了讨论。这些内容值得每一个致力于可持续混凝土建筑的人好好一读。

李维特 (Victor Li)

(ASCE、ASME、WIF、ACI 会士)

密歇根大学土木与环境工程系、材料科学与工程系

E. 本杰明 怀利 讲席教授

前 言

人口和城市化有着直接的关系。在过去的 100 年里，世界人口从 15 亿增长到 70 亿，目前有近 30 亿人口住在城市或者附近。在 20 个人口超千万的巨型城市中，有 17 个恰好都位于发展中国家。这些国家需要大量的材料用于住房、工厂、商业建筑、饮水和卫生设施、大坝和渠道、道路、桥梁、隧道以及其他基础设施的建设。其中主要的建筑材料是硅酸盐水泥混凝土。按体积计，世界上最大宗的人造材料就是混凝土了。因此，与其他建筑材料相比，建筑设计师和工程师们自然需要了解更多的混凝土知识。

本书主要供土木工程类学生使用，涵盖了现代混凝土技术中从事实际工作的工程师们感兴趣的各个主题。例如，为减轻混凝土对环境的冲击，有关火山灰质副产品、胶凝性副产品以及超塑化剂在高耐久性混凝土制备中的作用在书中都有全面的论述。

本书的一个目的是用简明、清晰和科学的方式介绍混凝土的技术和科学。工程材料的性能由其微观结构所决定，因此，对混凝土性能感兴趣的结构设计师和工程师们很有必要熟悉材料的微观结构。尽管混凝土的生产工艺看上去简单，但其微观结构十分复杂。混凝土包含有分布不均匀的许多固相组分，以及可能完全或部分填充着碱性溶液、形状和大小不一的孔隙。

与钢材、塑料和陶瓷等其他工程材料相比，混凝土的微观结构不是静止恒定的。这是因为其微观结构三相中的两相，即水泥浆本体和骨料与水泥浆之间的界面过渡区随时间变化而变化。事实上，混凝土英文词汇 concrete 源自于拉丁辞源 concretus，含有一起发育生长的意思。混凝土的强度取决于水泥水化产物的体积。这些水泥水化产物在数年内都会持续形成，从而使混凝土强度逐步提高。依据暴露环境的不同，混凝土表面渗透到内部的溶液有时会溶解水泥水化产物，使孔隙率提高，从而导致混凝土强度和耐久性降低；反之，当孔隙和微裂缝的反应物再结晶的时候，又有可能会提高混凝土的强度和耐久性。这就是为什么材料科学的分析方法可以很好地模拟和预测微结构稳定和均匀的材料的行为，但似乎对混凝土这种材料不太奏效的原因。

在题材组织方面，本书分三大部分。第一部分专门论述硬化混凝土的微观结构和性能，如强度、弹性模量、干缩、温度收缩、徐变、拉应变能力、渗透性以及各种劣化过程中的耐久性。各个性质的定义、重要性、起源以及影响因素均以简明扼要的方式置于章节前面加以介绍。第二部分是关于混凝土的配制原料和混凝土的制备加工。对水泥、骨料和外加剂的成分和性质分章进行了现状综述，还分章介绍了混凝土配合比设计、混凝土早期性能和混凝土无损伤检测方法。第三部分包含了一些混凝土技术专题。其中一章专门介绍了特种混凝土（如轻混凝土、高强混凝土、高性能混凝土、自密实混凝土、收缩-补偿混

凝土、纤维增强混凝土、透水混凝土、喷射混凝土、聚合物混凝土和大体积混凝土)的组成、性质和应用。另一章介绍了混凝土力学研究进展,包括混凝土的复合模型、徐变与收缩、热应力、混凝土断裂和混凝土耐久性。最后一章着重采用生态学的观点,对混凝土作为最广泛应用的建筑材料当前所面临的挑战进行了反思。

致 谢

本书第四版进行了全面的修订。作者诚挚地感谢以下朋友和专业上的同事们。没有他们的合作和帮助，本书的修订是无法完成的。

Grigory Isaakovich Barenblatt，对混凝土纳米力学一节作了颇有见地的评论。

Fabbri Antonin、Teddy Fen-Chongand 和 Patrick Dangla，对冰冻混凝土多孔介质力学一节作了评阅。Olivier Coussy 应该为他的研究团队感到骄傲。

John Bolander，对 12 章中纤维混凝土作了有价值的贡献。

Omkar Deo，提供了介绍透水混凝土的新材料。

Maria Garci，对第 2 章和第 10 章作了富有洞察力的评论。

Guoging Geng，在最后校对中做了很好的工作。

Claire Johnson，对稿件进行了仔细编辑。

Mônica Batista Leite，对再生骨料内容进行了讨论。

Maryanne McDarby，在编辑过程中给予了持续的支持。

Joclyn Norris，为插图作出了奉献。

Jae-Eun Oh，提供了现代混凝土建设的照片。

Rossella Pignatelli，对碱集料反应的多孔介质力学进行了讨论。

John Provis，对第 6 章和第 8 章作了全面的审阅。

Silvia Vieira，对骨料和水泥有关章节作了详细的审阅。

George W. Scherer，对盐剥落机理进行了讨论。

Gaurav Sant，介绍了缩减剂。

Rae Taylor，对水化产物形貌作了多次讨论并提供了精美的 TEM 图像。

Mason Walters，提供了加州大学伯克利分校体育场的施工照片。

P. Kumar Mehta

Paulo J. Monteiro

加州大学伯克利分校

目 录

译序	
序	
前言	
第一部分 硬化混凝土的微观结构和性能	1
第1章 概论	3
内容提要	3
1.1 混凝土作为一种结构材料	3
1.2 现代混凝土的组分	11
1.3 混凝土的类型	11
1.4 硬化混凝土的性质及其意义	12
1.5 计量单位	14
本章测验	15
进一步学习的文献	16
第2章 混凝土的微观结构	17
内容提要	17
2.1 定义	17
2.2 意义	17
2.3 复杂性	17
2.4 骨料相的微观结构	19
2.5 水化水泥浆体的微观结构	21
2.5.1 水化水泥浆体中的固相	22
2.5.2 水化水泥浆体中的孔	23
2.5.3 水化水泥浆体中的水分	26
2.5.4 水化水泥浆体中的微观结构-性能关系	27
2.6 混凝土中的界面过渡区	31
2.6.1 界面过渡区的重要性	31
2.6.2 微结构	32
2.6.3 强度	33
2.6.4 界面过渡区对混凝土性能的影响	33

本章测验	34
参考文献	35
进一步学习的文献	35
第3章 强度	37
内容提要	37
3.1 定义	37
3.2 重要性	37
3.3 强度与孔隙率的关系	38
3.4 混凝土的破坏方式	39
3.5 抗压强度及其影响因素	39
3.5.1 材料特性与配合比	40
3.5.2 养护条件	46
3.5.3 试验参数	48
3.6 不同应力状态下混凝土的行为	50
3.6.1 单轴压应力作用下混凝土的行为	50
3.6.2 单轴拉应力作用下混凝土的行为	52
3.6.3 抗压强度与抗拉强度的关系	56
3.6.4 大体积混凝土的抗拉强度	57
3.6.5 剪应力作用下混凝土的行为	58
3.6.6 双轴和多轴应力作用下混凝土的行为	58
本章测验	60
参考文献	61
进一步学习的文献	61
第4章 尺寸稳定性	63
内容提要	63
4.1 变形的类型及其重要性	63
4.2 弹性行为	64
4.2.1 应力应变关系的非线性	64
4.2.2 弹性模量的类型	66
4.2.3 静弹性模量的测定	67
4.2.4 泊松比	68
4.2.5 影响弹性模量的因素	69
4.3 干缩和徐变	70
4.3.1 原因	71
4.3.2 荷载和湿度条件对干缩和黏弹性行为的影响	71
4.3.3 可逆性	73
4.3.4 影响干缩和徐变的因素	74
4.4 温度收缩	80
4.4.1 影响温度应力的因素	81

4.5	混凝土的热学性质	84
4.6	延性与开裂	85
	本章测验	86
	参考文献	87
	进一步学习的文献	87
第5章	耐久性	89
	内容提要	89
5.1	定义	89
5.2	重要性	90
5.3	概述	90
5.4	水作为破坏的介质	91
5.4.1	水的结构	91
5.5	渗透性	92
5.5.1	硬化水泥浆体的渗透性	93
5.5.2	骨料的渗透性	93
5.5.3	混凝土的渗透性	94
5.6	混凝土劣化原因的分类	95
5.7	表面磨损	97
5.8	孔隙中盐类的结晶	99
5.9	冰冻作用	100
5.9.1	冰冻作用对硬化水泥浆体的影响	101
5.9.2	冰冻对骨料的作用	104
5.9.3	控制混凝土抗冻性的因素	105
5.9.4	混凝土受冻和盐剥落	108
5.10	火灾	108
5.10.1	高温对水泥浆体的影响	109
5.10.2	高温对骨料的影响	109
5.10.3	高温对混凝土的影响	110
5.10.4	高强混凝土在火灾中的表现	111
5.11	化学反应引起的混凝土劣化	112
5.11.1	水泥浆体组分的水解	114
5.11.2	阳离子交换反应	114
5.12	膨胀性产物形成的反应	115
5.13	硫酸盐侵蚀	115
5.13.1	硫酸盐侵蚀中的化学反应	116
5.13.2	延迟钙矾石的形成	117
5.13.3	案例	118
5.13.4	硫酸盐侵蚀的控制	121
5.14	碱-骨料反应	122

5.14.1	引发碱-硅反应的水泥和骨料品种	123
5.14.2	膨胀机理	125
5.14.3	案例	126
5.14.4	膨胀的控制	126
5.15	结晶 MgO 和 CaO 的水化	128
5.16	混凝土中埋入钢筋的锈蚀	128
5.16.1	埋设钢筋锈蚀引发混凝土劣化的机理	129
5.16.2	案例选析	131
5.16.3	锈蚀的控制	133
5.17	混凝土劣化整体模型	134
5.18	海洋环境中的混凝土	137
5.18.1	理论方面	137
5.18.2	劣化混凝土的案例	139
5.18.3	来自案例的教训	141
	本章测验	142
	参考文献	143
	进一步学习的文献	145
	总论	145
	暴露在高温中的混凝土	146
	耐久性的化学问题	146
	硫酸盐侵蚀	146
	碱-骨料膨胀	146
	钢筋的锈蚀	146
	海水侵蚀	147
	冰冻与火灾	147
第二部分 混凝土原材料、配合比和早龄期性能		149
第 6 章 水硬性水泥		151
	内容提要	151
6.1	水硬性和非水硬性胶凝材料	151
6.1.1	石膏和石灰中的化学	151
6.2	硅酸盐水泥	152
6.2.1	生产过程	152
6.2.2	化学组成	154
6.2.3	由化学分析结果计算熟料矿物组成	155
6.2.4	熟料矿物的晶体结构和活性	156
6.2.5	细度	158
6.3	硅酸盐水泥的水化	158
6.3.1	意义	158

6.3.2	水化机理	159
6.3.3	铝酸盐的水化	161
6.3.4	硅酸盐的水化	163
6.3.5	C-S-H 的结构模型	164
6.4	水化热	165
6.5	凝结、硬化过程的物理特性	166
6.6	水泥特性对强度和水化热的影响	167
6.7	硅酸盐水泥的种类	169
6.8	特种水硬性水泥	172
6.8.1	分类和术语	172
6.8.2	混合硅酸盐水泥	173
6.8.3	膨胀水泥	177
6.8.4	快凝和快硬水泥	179
6.8.5	油井水泥	179
6.8.6	白水泥和彩色水泥	180
6.8.7	铝酸钙水泥	181
6.9	水泥标准的发展趋势	184
	本章测验	187
	参考文献	188
	进一步学习的文献	189
第7章	骨料	191
	内容提要	191
7.1	意义	191
7.2	分类和命名	191
7.3	天然矿物骨料	192
7.3.1	岩石分类	192
7.3.2	矿物类型	193
7.4	轻骨料	196
7.5	重骨料	197
7.6	高炉矿渣骨料	198
7.7	粉煤灰烧结骨料	198
7.8	再生混凝土骨料	198
7.9	骨料的生产	201
7.10	骨料特性及其意义	202
7.10.1	密度和视比重	202
7.10.2	吸水性和表面水分	203
7.10.3	压碎强度、耐磨性和弹性模量	204
7.10.4	坚固性	204
7.10.5	粒径和级配	205