

混凝土

微观结构、
性能
和材料

CONCRETE

Microstructure,
Properties,
and Materials

原著第三版

(美) 库马·梅塔 (P.Kumar Mehta)
(美) 保罗 J.M. 蒙特罗 (Paulo J.M.Monteiro)
覃维祖、王栋民、丁建彤



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

TU528
40

混 凝 土

微观结构 性能 和材料

(美) 库马·梅塔 (P.Kumar Mehta) 著
(美) 保罗 J.M. 蒙特罗 (Paulo J.M.Monteiro)
覃维祖、王栋民、丁建彤 译



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

P. Kumar Mehta, Paulo J. M. Monteiro Concrete

Microstructure, Properties and Materials

ISBN: 0 - 07 - 146289 - 9

Copyright © 2006 by The McGraw-Hill Companies, Inc. All rights reserved. Printed in the United States of America. Except as permitted under the United States Copyright Act of 1976, no part of this publication may be reproduced or distributed in any form or by any means, or stored in a data base or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Simplified Chinese translation edition jointly published by McGraw-Hill Education (Asia) Co. and China Electric Power Press.

本书中文简体字翻译版由中国电力出版社和美国麦格劳-希尔教育(亚洲)出版公司合作出版。未经出版者先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有 McGraw-Hill 公司防伪标签,无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记号: 01 - 2007 - 0704

图书在版编目 (CIP) 数据

混凝土: 微观结构、性能和材料: 原著第 3 版/ (美) 梅塔 (Mehta, P. K.), (美) 蒙特罗 (Monteiro, P. J. M.) 著; 覃维祖, 王栋民, 丁建彤译. —北京: 中国电力出版社, 2008

书名原文: Concrete Microstructure, Properties and Materials

ISBN 978 - 7 - 5083 - 6457 - 5

I. 混… II. ①梅…②蒙…③覃…④王…⑤丁… III. 混凝土 - 研究 IV. TU528

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 192421 号

中国电力出版社出版发行

北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>

策划编辑: 张鹤凌

责任印制: 陈焊彬 责任校对: 李 亚

北京市同江印刷厂印刷·各地新华书店经售

2008 年 9 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16 · 28.5 印张 · 710 千字

定价: 68.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

本社购书热线电话 (010 - 88386685)

翻译人员名单

第一篇 刘数华 覃维祖

第二篇 王栋民 左彦峰 龙俊余 刘娟红

苏 胜 李 俏 彷徨峰 范德科

罗小红 侯云芬 扈士凯 熊卫锋

第三篇 丁建彤

译 者 序

P. K. 梅塔 (P. K. Mehta) 教授对于中国的混凝土界人士来说并不陌生, 他的《混凝土 结构、性能与材料》一书 1986 年在美国出版后, 1991 年由同济大学出版社出版了该书的中译本。该书的第二版更名为《混凝土: 微结构、性能与材料》, 并与保罗 J. M. 蒙特罗 (Paulo J. M. Monteiro) 合作, 于 1993 年出版; 随后, 两人合作所著该书的第三版于 2005 年也与读者见面了。

但是, 与该书的主要内容为美国、中国和许多其他国家的读者所熟悉和了解不同, 梅塔教授在该书中提出^[1]: “混凝土世界与人类世界一样是非线性的, 且在非线性中还有着不连续性”的概念, 尤其是在该书和近年来发表的许多文章里反复强调的整体论思想, 至今理解和引起共鸣的人似乎还不多。

什么是整体论和还原论科学思想? 我国混凝土科学技术的先驱与奠基人, 已故的中国工程院院士吴中伟先生指出^[2]: 科学思想分为两大派系, 整体 (综合) 论与还原 (分解) 论, 过去整体论用得最普遍——中医辨证施治可为一例。近代科研手段精进, 还原论用得更为普遍。即将研究对象还原或分解到可能达到的最小单位, 进行具体的量化研究, 还原论对当代自然科学与技术科学的发展已产生很大作用, 但缺点是分得愈细, 愈易脱离整体和实际, 因此无法从整体来全面有效地解决问题或认识事物的本质。

这与梅塔教授的说法如出一辙^[3]——毫无疑问, 今天的社会正享受着科学和工业革命带来的好处。原因分析法已成为现代科学思维的主要特征, 并在科学理论的发展和许多引人注目的技术成果实施上证实它很有用。但是, 过分强调科学的还原论——相信一个复杂结构的所有方面和一种复杂现象可以通过将整体分解为许多部分而充分认识——导致了知识的破碎性和局限性。许多领域的专业人员正逐渐认识到这个问题。

为什么两位国际混凝土界的泰斗面对飞速发展的混凝土技术, 却不约而同地在世纪之交发出混凝土科学思想需要进行范式转换的呼吁呢? 如果我们认真思索 Mehta 教授的一些论述就不难理解了。

“一些屹立了 2000 年之久的无筋混凝土结构, 例如用缓慢硬化的火山灰—石灰水泥建造的古罗马万神殿和欧洲的几条输水古道仍然完好; 同时 20 世纪用波特兰水泥建造的钢筋混凝土结构则迅速地劣化。当暴露在侵蚀环境, 例如除冰盐和海水中, 桥面板、停车场、海底隧道和其他海工结构在不到 20 年时间就出现严重的耐久性问题。”^[4]

“要提高混凝土耐久性, 就需要舍弃一直在尝试但没有多大成效的还原论方法, 而代之以基于混凝土劣化整体论模型的方法。该方法将会给我们当前的混凝土工程实践带来根本性的转变, 探索一条能够交付不出现开裂的成品, 而不再继续推行快速施工的一套做法。”^[5]

“整体论方法的根基是整体先于部分存在。例如, 整体论将社会看作一个整体, 混凝土业作为整体的一部分。因此, 除了提供廉价的建筑材料以外, 混凝土业必须考虑社会的其他需求。例如, 地球天然资源的保护与安全地储存其他工业产生的有污染性废料。”^[5]

是的, 正是出于对普遍存在的混凝土结构耐久性的担忧, 对混凝土技术可持续发展前景

的关注，他们为新世纪混凝土领域工程教育和科研指明了方向，作为正处于基础设施建设高潮的中国混凝土工程教育、建设或者未来的工作者们，需要在阅读这本著作时更加潜心于思索并力求深刻理解那些高屋建筑的见识和理念！

[1] P. K. Mehta. Concrete Structure, Properties and Materials [M]. New York: McGraw Hill. 1986.

[2] 吴中伟. 绿色高性能混凝土与科技创新. 建筑材料学报. 1998, 1 (1).

[3] P. K. Mehta. Concrete Technology at the Crossroads — Problems and Opportunities. Concrete Technology, Past, Present and Future. ACI SP144 - 1 (1994).

[4] P. K. Mehta. Building Durable Structures in The 21st Century [J]. Concrete International. March, 2001.

[5] P. K. Mehta. Concrete: Microstructure, Properties and Materials [M]. 3rd ed. New York: McGraw Hill, 2005.

序

近年来，有很多关于混凝土技术的书籍可供土木工程类学生使用，但其中绝大部分还是以传统的方法解决问题，例如，只描述混凝土配制材料的特性和混凝土的工程性能而没有充分涉及控制这些性能的材料科学。P. K. Mehta 教授和 Paulo Monteiro 教授就职于加利福尼亚大学伯克利分校，由他们撰写的混凝土技术专著的前两版，采用已普遍应用于所有材料科学专著的微结构—性能关系方法对混凝土的强度、耐久性和其他工程性能提供了科学解释。该方法广受赞许，这可以从本书已经用数种语言翻译和出版得到证明。

现在，作者们推出了第三版，该版不仅保留了前两版独特而简洁明了的风格，而且扩展到涵盖对混凝土感兴趣的学生和专业工程师们一些十分重要的主题。使混凝土能够耐久极为重要，是混凝土业可持续发展的本质，也是本书的一大特点。耐久性这一章以系统的方法引导读者去理解混凝土劣化的主要原因及其控制，并总结了建造耐久混凝土结构的整体方法。作者成功地将混凝土的焦点由强度转换为耐久性，这是非常值得赞扬的。

同时，该书第三版还包括一章全面介绍无损检测的方法，并且完全改写了介绍混凝土技术最新进展，包括高性能混凝土、高掺量粉煤灰混凝土和自密实混凝土的那一章。本书另外一个特点是包含约 250 幅线条图和大量照片，以此说明所讨论的主题。本书内容设计完美，可供本科生、研究生、结构设计者和工程师们使用。对于那些正在寻找优秀的现代混凝土技术论著的人来说，或为课堂讲授，或为专业利用，没有什么比这本书更值得推荐了。

V. Mohan Malhotra

加拿大渥太华加拿大矿物与能源技术中心退休科学家

前 言

人口和都市化之间有着直接的关系。在最近 100 年里，世界人口已经从 15 亿激增到 60 亿，其中近 30 亿人口居住在城市或附近；20 个百万人口的大城市中，有 17 个人口达到或超过 1000 万，并且这些城市恰好都位于发展中国家，那里需要大量的材料用于住房、工厂、商业大楼、饮用水和卫生设施、大坝和渠道、道路、桥梁、隧道以及其他基础设施的建设。主要的建筑材料是硅酸盐水泥混凝土。按体积计算，当今世界最大的人造产品是混凝土。自然而然，设计和建筑工程师需要了解混凝土的知识应该比其他建筑材料更多。

本书并不打算对混凝土进行详尽的论述，它首先是供土木工程类学生们使用，涵盖了**现代混凝土技术的诸多主题**，这对从事于实践的工程师们应该很有吸引力。例如，为减小混凝土对环境的影响，采用火山灰和胶凝性副产品及超塑化剂生产高耐久混凝土贯穿于本书。

本书的目的之一是用**简洁、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结构决定，因此，很需要让关注混凝土性能的结构设计者和工程师们熟悉其微结构。尽管混凝土的生产工艺看上去很简单，而**产品的微结构却非常复杂**。混凝土含有许多分布不均匀的固相组分，以及完全或部分地被碱性溶液所填充的、不同形状与大小的孔隙。

与其他工程材料，如钢材、塑料和陶瓷相比，混凝土的微结构并不是一种静止的性质。这是因为其微结构的三相中有两相，即水泥浆本体和骨料与水泥浆之间的界面过渡区是随时间而变化的。实际上，**混凝土 (concrete)** 一词来自拉丁文的 **concretus**，该术语的意思是生长。混凝土的强度取决于多年不断形成水泥水化产物的体积，它会导致强度逐渐提高；根据暴露环境的不同，从混凝土表面渗透到内部的溶液有时会溶解水泥水化的产物从而引起孔隙率增大，这将使混凝土的强度和耐久性降低；反之，当孔隙和微裂缝里的反应产物再结晶时，可能会提高材料的强度和耐久性。这就解释了为什么材料科学的分析方法用于建模和预测微结构稳定和匀质材料的行为，似乎对混凝土微结构并不适用。

关于题材的组织，本书分为三部分。**第一部分**专门论述硬化混凝土的微结构和性能，如强度、弹性模量、干缩、热收缩、徐变、拉应变能力、渗透性以及各种劣化过程中的耐久性。每种性能的定义、重要性和起源及其影响因素均以简明扼要的方式阐明。**第二部分**讲的是混凝土的配制材料和混凝土的加工。水泥、骨料和外加剂的成分和性质分别在各章中进行了现状综述，还对混凝土的配合比设计、早期混凝土的性能和无损检测方法分章进行介绍。**第三部分**包含了一些混凝土技术的专题，分章专门论述特种混凝土（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、纤维混凝土、聚合物混凝土和大体积混凝土）的组分、性能和应用。并有单独的一章论述混凝土力学的研究进展，包括混凝土的复合模型、徐变与收缩、热应力和断裂。最后一章包含对混凝土作为应用最广泛的材料当前面临挑战的一些反思，特别强调了以生态学的观点考虑问题。

本书的一个特色，是包含了许多独特的图表、照片和总结性表格，这将有助于讲解。新的术语用斜体字标出并明确定义。每章的开头均有内容提要，结尾有知识测试和进一步阅读的指南。

致 谢

第三版对此书进行了全面的修订，没有许多朋友和专业同事的帮助与合作是不可能完成的。作者向他们致以诚挚的谢意：

Paul Acker，对自收缩作了颇有见地的评论。

Hakan Atahan，在排版和校正上提供了帮助。

Paulo Barbosa，对许多图片进行了数字化。

Dale Bentz，对界面过渡区进行了计算机模拟。

Luigi Biolzi，给我们提供了很多有用的欧洲建筑实例。

Joshua Blunt，最后校正。

Nick Carino，对无损检测一章进行评论。

Mario Collepardi，允许我们使用混凝土耐久性的录像集。

Harvey Haynes，提供了物理性硫酸盐侵蚀的照片。

Harold Hirth，在电脑动画中提供了帮助。

Claire Johnson，对原稿的仔细编辑。

Carmel Joliquier，提供超塑化剂图片。

David Lange，允许使用录像集。

Mauro Letizia，幻灯片设计。

Mohan Malhotra，允许使用加拿大矿产能源技术中心的部分粉煤灰和无损检测录像。

Mauricio Mancio，最后校正。

Jose Marques Filho，碾压混凝土录像。

Maryanne McDarby，编辑过程中给予的连续支持。

Ana Christina 和 Lucila Monteiro，对表格和版面设计给予了帮助。

Joclyn Norris，在 CD 碟的插图和设计中的细致工作。

Patricia Pedrozo，录像压缩中的细致工作。

G. Tognon，允许我们使用部分罗马混凝土录像。

David Trejo，新拌混凝土录像。

目 录

翻译人员名单
译者序
序
前言
致谢

第一篇 硬化混凝土的微结构和性能

第1章 绪论	3
本章提要	3
1.1 混凝土：一种结构材料	3
1.2 现代混凝土的组分	9
1.3 混凝土的类型	9
1.4 硬化混凝土的性能及其重要性	10
1.5 计量单位	12
知识考察	13
进一步学习的建议	13
第2章 混凝土的微结构	14
本章提要	14
2.1 定义	14
2.2 重要性	14
2.3 复杂性	14
2.4 骨料相的微结构	16
2.5 水化水泥浆体的微结构	17
2.5.1 水化水泥浆体中的固相	18
2.5.2 水化水泥浆体里的孔	20
2.5.3 水化水泥浆体中的水分	21
2.5.4 水化水泥浆体中的微结构—性能关系	22
2.6 混凝土中的过渡区	26
2.6.1 过渡区的重要性	26
2.6.2 微结构	26
2.6.3 强度	27
2.6.4 过渡区对混凝土性能的影响	28
知识考察	29

参考文献	29
进一步学习的建议	29
第3章 强度	31
本章提要	31
3.1 定义	31
3.2 重要性	31
3.3 强度与孔隙率的关系	32
3.4 混凝土的破坏方式	33
3.5 抗压强度及其影响因素	33
3.5.1 材料特性与配合比	33
3.5.2 养护条件	38
3.5.3 试验参数	40
3.6 不同应力状态下混凝土的行为	41
3.6.1 单轴压缩作用下混凝土的行为	41
3.6.2 单轴拉应力作用下混凝土的行为	43
3.6.3 抗压强度与抗拉强度的关系	46
3.6.4 大体积混凝土的抗拉强度	48
3.6.5 剪应力作用下混凝土的行为	48
3.6.6 双轴和多轴应力作用下混凝土的行为	49
知识考察	50
参考文献	51
进一步学习的建议	51
第4章 尺寸稳定性	53
本章提要	53
4.1 变形的类型及其重要性	53
4.2 弹性行为	54
4.2.1 应力—应变关系的非线性	54
4.2.2 弹性模量的类型	56
4.2.3 静弹模的测定	57
4.2.4 泊松比	58
4.2.5 影响弹性模量的因素	59
4.3 干缩和徐变	60
4.3.1 原因	61
4.3.2 荷载和湿度条件对干缩和黏弹性行为的影响	61
4.3.3 可逆性	63
4.3.4 影响干缩和徐变的因素	63
4.4 热收缩	69

4.4.1 影响热应力的因素	69
4.5 混凝土的热学性能	73
4.6 延伸性与开裂	74
知识考察	75
参考文献	76
进一步学习的建议	76
第5章 耐久性	77
本章提要	77
5.1 定义	77
5.2 重要性	77
5.3 概述	78
5.4 水作为破坏的介质	78
5.4.1 水的结构	79
5.5 渗透性	80
5.5.1 硬化水泥浆体的渗透性	80
5.5.2 骨料的渗透性	81
5.5.3 混凝土的渗透性	82
5.6 混凝土劣化原因的分类	83
5.7 表面磨损	84
5.8 孔隙中盐类的结晶	86
5.9 冰冻作用	86
5.9.1 冰冻作用对硬化水泥浆体的影响	87
5.9.2 冰冻对骨料的作用	90
5.9.3 控制混凝土抗冻性的因素	90
5.9.4 混凝土受冻和盐剥落	93
5.10 火灾的影响	93
5.10.1 高温对水化水泥浆体的影响	94
5.10.2 高温对骨料的影响	94
5.10.3 高温对混凝土的影响	94
5.10.4 高强混凝土在火灾中的表现	95
5.11 混凝土由于化学反应造成的劣化	97
5.11.1 水泥浆体组分的水解	98
5.11.2 阳离子交换反应	98
5.12 形成膨胀产物的反应	99
5.13 硫酸盐侵蚀	100
5.13.1 硫酸盐侵蚀中的化学反应	100
5.13.2 延迟钙矾石的形成	101
5.13.3 案例选引	102

5. 13. 4 硫酸盐侵蚀的控制	105
5. 14 碱—骨料反应	106
5. 14. 1 对碱—硅反应起作用的水泥和骨料品种	106
5. 14. 2 膨胀机理	108
5. 14. 3 案例选引	109
5. 14. 4 膨胀的控制	109
5. 15 结晶 MgO 和 CaO 的水化	110
5. 16 混凝土中埋入钢筋的腐蚀	111
5. 16. 1 埋设钢筋锈蚀而引起混凝土劣化的机理	111
5. 16. 2 案例选引	113
5. 16. 3 锈蚀的控制	114
5. 17 混凝土劣化整体模型的发展	115
5. 18 海水中的混凝土	118
5. 18. 1 理论方面	118
5. 18. 2 已劣化混凝土的案例	120
5. 18. 3 从案例中得到的教训	121
知识考察	123
参考文献	124
进一步学习的建议	126

第二篇 混凝土原材料、配合比和早龄期性能

第 6 章 水硬性水泥	131
本章提要	131
6. 1 水硬性和非水硬性胶凝材料	131
6. 1. 1 石膏和石灰的化学反应	131
6. 2 硅酸盐水泥	131
6. 2. 1 生产过程	132
6. 2. 2 化学组成	134
6. 2. 3 通过化学分析确定熟料矿物组成	135
6. 2. 4 熟料矿物的晶体结构和活性	136
6. 2. 5 细度	138
6. 3 硅酸盐水泥的水化	138
6. 3. 1 意义	138
6. 3. 2 水化机理	139
6. 3. 3 铝酸盐的水化	139
6. 3. 4 硅酸盐的水化	142
6. 4 水化热	143
6. 5 凝结、硬化过程的物理特性	144
6. 6 水泥特性对强度和水化热的影响	145

6.7 硅酸盐水泥的种类	146
6.8 特种水硬性水泥	149
6.8.1 分类和术语	149
6.8.2 混合硅酸盐水泥	150
6.8.3 膨胀水泥	155
6.8.4 快凝、快硬水泥	155
6.8.5 油井水泥	156
6.8.6 白水泥和彩色水泥	157
6.8.7 铝酸钙水泥	158
6.9 水泥标准的发展趋势	161
知识考察	162
参考文献	164
进一步学习的建议	164
第7章 骨料	165
本章提要	165
7.1 意义	165
7.2 分类和命名	165
7.3 天然矿物骨料	166
7.3.1 岩石分述	166
7.3.2 矿物分述	167
7.4 轻骨料	170
7.5 重骨料	170
7.6 高炉矿渣骨料	171
7.7 从粉煤灰制得的骨料	172
7.8 从再生混凝土和城市垃圾所制得的骨料	172
7.9 骨料的制备	173
7.10 骨料的特性及其意义	174
7.10.1 密度和视比重	175
7.10.2 吸水性和表面潮湿状态	175
7.10.3 压碎强度、耐磨性和弹性模量	176
7.10.4 体积稳定性	176
7.10.5 粒径和级配	177
7.10.6 粒形和表面织构	180
7.10.7 有害物质	181
知识考察	182
参考文献	183
进一步学习的建议	183

第 8 章 外加剂	185
本章提要.....	185
8.1 意义	185
8.2 术语、规范和分类	185
8.3 表面活性剂	187
8.3.1 术语和化学组成	187
8.3.2 作用机理	187
8.3.3 应用	188
8.3.4 超塑化剂	190
8.4 调凝剂	191
8.4.1 术语和组成	191
8.4.2 作用机理	192
8.4.3 应用	193
8.5 矿物外加剂	195
8.5.1 意义	195
8.5.2 分类	196
8.5.3 天然火山灰材料	197
8.5.4 工业副产品	199
8.5.5 应用	202
8.6 结语	205
知识考察.....	206
参考文献.....	207
进一步学习的建议.....	208
第 9 章 混凝土的配合比	209
本章提要.....	209
9.1 意义和目的	209
9.2 基本考虑	210
9.2.1 成本	210
9.2.2 工作性	210
9.2.3 强度和耐久性	211
9.2.4 理想的骨料级配	211
9.3 具体原则	212
9.3.1 工作性	212
9.3.2 强度	212
9.3.3 耐久性	213
9.4 设计步骤	213
9.5 计算实例	217
9.6 ACI 用公制单位的表格	219

9.7 高强和高性能混凝土的配合比设计	220
附录：由规定强度确定平均抗压强度的方法	221
知识考察	223
参考文献	224
进一步学习的建议	224
第10章 早龄期混凝土	225
本章提要	225
10.1 定义和意义	225
10.2 配料、拌合与运输	226
10.3 浇灌、捣实和抹面	229
10.4 混凝土的养护和脱模	232
10.5 工作性	233
10.5.1 定义和意义	233
10.5.2 测量	233
10.5.3 影响工作性的因素及其控制	235
10.6 坍落度损失	237
10.6.1 定义	237
10.6.2 重要性	237
10.6.3 原因和控制	237
10.7 离析和泌水	240
10.7.1 定义和重要性	240
10.7.2 测定	240
10.7.3 原因和控制	240
10.8 早期的体积变化	241
10.8.1 定义和重要性	241
10.8.2 原因和控制	241
10.9 凝结时间	242
10.9.1 定义和重要性	242
10.9.2 测定和控制	243
10.10 混凝土的温度	244
10.10.1 意义	244
10.10.2 寒冷气候中浇筑混凝土	245
10.10.3 炎热气候中浇筑混凝土	246
10.11 混凝土质量的测试和控制	248
10.11.1 方法及其意义	248
10.11.2 快速强度实验	248
10.11.3 钻芯试件试验	249
10.11.4 质量控制图	249