

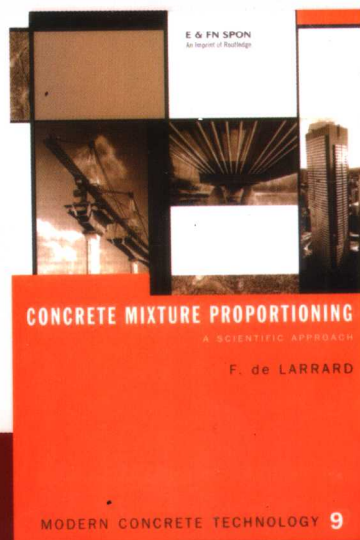
混凝土混合料的配合

[法] 弗朗索瓦·德拉拉尔 著
廖 欣 叶枝荣 李启令 译

Chemical Industry Press



化学工业出版社
材料科学与工程出版中心



混凝土混合料的配合

[法] 弗朗索瓦·德拉拉尔 著
廖 欣 叶枝荣 李启令 译



化学工业出版社
材料科学与工程出版中心

· 北 京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

混凝土混合料的配合/[法](de Larrard, F.)著;廖欣,叶枝荣,李启令译.北京:化学工业出版社,2004.6

书名原文:Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach

ISBN 7-5025-5662-1

I. 混… II. ①德…②廖…③叶…④李… III. 混凝土-配合料
IV. TU528.041

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 062642 号

Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach/by François de Larrard
ISBN 0-419-23500-0

Copyright © 1999 by François de Larrard. All rights reserved. No part of this book may be reprinted or reproduced or utilized in any form or by any electronic, mechanical, or other means, now known or hereafter invented, including photocopying and recording, or in any information storage or retrieval system, without permission in writing from the publishers.

Authorized translation from the English language edition published by Spon Press, a member of the Taylor & Francis Group.

本书中文简体字版由 Taylor & Francis Group 授权化学工业出版社独家出版发行。未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号:01-2003-5526

混凝土混合料的配合

[法] 弗朗索瓦·德拉拉尔 著

廖欣 叶枝荣 李启令 译

责任编辑: 窦臻

文字编辑: 孙凤英

责任校对: 顾淑云 宋玮

封面设计: 潘峰

*

化学工业出版社出版发行

材料科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

http://www.cip.com.cn

*

新华书店北京发行所经销

大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 24 1/4 字数 441 千字

2004 年 9 月第 1 版 2004 年 9 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5662-1/TB·44

定价: 55.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

译者说明

在中文译本终于脱稿、并经改定即将出版之际，我们愿就该译本做如下两点说明。

1. 译稿所据蓝本为 1999 年由英国 E&FN Spon 出版社首版发行的英文原著 CONCRETE MIXTURE PROPORTIONING—A scientific approach (ISBN 0419235000)。我们在对原著有关内容的翻译过程中，参阅并对照过该书的法语译本。鉴于书名副标题中 approach 一词在此兼有“方法”和“途径”二义（Neville 语，见本书序），作者的深意由此也可窥其一斑，故在书名的翻译上，我们保留了副标题的原文，未直接翻译成中文。

2. 原著索引（Index）部分按索引词的首位字母顺序排列，中译本沿用此原则，但改为按中文索引词的汉语拼音的首位字母顺序排列。原著索引系主题索引，中译本索引部分也同样具有这个特点。

本书的具体分工为：叶枝荣（第 1 章、第 5 章的 5.1~5.3）；廖欣（第 2 章、第 3 章、第 5 章的 5.4~5.5 以及序言、前言、谢词、结语、索引）；李启令（第 4 章）。

本书得以印行，应当感谢化学工业出版社各位编辑的鼓励和帮助以及各方朋友的支持和鞭策。但是，由于我们水平有限，错误难免，还望广大读者不吝赐教，多加指正。

译 者

2004 年 5 月于同济大学

序

要为此书写一篇序文固然是一种快乐，但是，这项任务同时也存在着不少困难，尽管这份快乐源自这项工作十分重要，然而，我却感到还是应该先来表露一下我自己的一些“难点”所在。

诚如 François de Larrard 在邀我写这篇序文的来信中所言，我对混凝土的研究方法是实用性的，同时又对配合比设计的各类常用数学模型存有种种疑虑。在我 1995 年出版的《混凝土性能》（第 4 版）中，我曾说道：“靠一些表格或计算机数据，一般不可能制定确切的配合比：所用材料实质上是可变的，其许多性能又不能真切地得到定量评估。例如，我们不可能以一种完全令人满意的方法去定义骨料的级配、形状及构造”。

我曾对一些商业模型有过思考，从中萌生出我的这些看法。这类模型在澳大利亚、联合王国和美利坚合众国都曾产生过，每一个都仅以范围有限的试验数据为基础，却都声称其普遍有效。它们的关键特征在于其与试验数据之间存在着统计性的契合，而缺少实在的物理现象概念上的必要说明。各变量间的关联未必能用来意指因果关系。例如，在某个州近十年的时间里，酒精类饮料的消费量是递增的，与此同时，教师们的工资也呈递增趋势。于是，就得出结论说，支付给教师的越多，酒精类饮料喝掉的也越多。这个例子也许并不足凭信，但也绝非空穴来风。

事实是，一些工程师确已跌入这类陷阱之中，而 de Larrard 并非如此。他的这些模型是物理的模型，只要可能，其各种参数都对应着被测量值。本书展示的是其工作中一部分成果相当可观的内容。不可否认的是，如果不能用数学语言来表达所观察到的这些现象，那么，被观察到的这些关系也不可能得到推广应用。与此同时，如果这种数学语言不能以一种经得起逻辑推敲的方式与物理性的现象相关联，那么，在运用这样一个有效范围尚属未知的模型的过程中，就会存在巨大的风险。

读罢 de Larrard 的这本书，我完全认同了他所走的这条正确途径。为了将混凝土的应用，其首先是配合比设计，带入与其他材料如高聚物和金属的应用相通的路线中来，这是一条必须被遵循的路径。换言之，de Larrard 的方法将

使混凝土成为一种真正地按目标设计的人造材料，而不只是一种重新构造的岩石。

这里我使用将来时态，也许会令人产生尚未完全解决问题的印象。但是这并非对 de Larrard 工作的批评：正如我在前面提及的，不无遗憾的是我们至今尚无能力对骨料的所有性质加以量化，因而，目前无人能取得更大的进展。这是一项颇难对付的任务。没有进一步的基础研究，还是能够获得完成这项任务的物理性方法的；而真正的困难却在于这样一个事实，即“混凝土圈”内的实业性部门对他的必要工作竟无一表现出任何兴趣来。

说起 de Larrard 的各种模型，给我印象深刻的是在证实这些模型时他运用了一些相互独立的、内在连贯相干的数据组合，并从未与实际过程有所抵牾。要把今天最普通的建筑材料，即一般混凝土发展到在任何情况下都能按目的加以设计并能按预期用途进行制作的混凝土，他的方法将是一条最佳的途径。

我还愿做一些更全面的介绍，François de Larrard，一位深得多种工业学派传承的法兰西人，他写这本书，选择的并非是爱被法国人称作 Molière（莫里哀，法国剧作家——译者注）语言的那种文字，也就是被 de Larrard 引用的 Descartes（笛卡尔，法国哲学家——译者注）语录的那种文字，而是选择了已明确成为科学、技术乃至更多领域的全球性语言的这种文字。但他却保留了笛卡尔的研究方法，我们应该对他把这种严密性带到混凝土研究中来表示十分的感谢。

时至今天，这一边是法国的对混凝土十分注重数学手段的研究方法，那一边则是英美两国的实用性的研究方法，说实在的，这两者之间极少交流和联系。谈论混凝土的法语书籍鲜有被译成英语的；绝无仅有的一例，也就是1998年我的《混凝土性能》一书曾出过一个法语译本（而早在若干年里，此书已被译成二十种其他语言了）。然而，正是英吉利海峡两岸和大西洋两岸都需要同样有着良好设计的混凝土混合料，法兰西方式和盎格鲁-美利坚方式的联姻势必会十分有利于混凝土的全体使用者。而这本英语写成的“法国人的（原文为 French 有“法语”的双关含意——译者注）”书，将会是非常受欢迎的。它的标题中含有这样的字眼“一种科学的方法”。它既是土建工程师眼中的一种科学方法，也是我们今后发展的一个方向。

Adam Neville CBE, FEng

伦 敦

1998 年 4 月 15 日

前 言

...diviser chacune des difficultés que j'examinerais en autant de parcelles qu'il se pourrait, et qu'il serait requis pour les mieux résoudre...

...conduire par ordre mes pensées, en commençant par les objets les plus simples et les plus aisés à connaître, pour remonter peu à peu, comme par degrés, jusques à la connaissance des plus composés...

...faire partout des dénombrements si entiers et des revues si générales, que je fusse assuré de ne rien omettre.

……对我应考察的每个难点，只要有更好解决的必要，就要尽可能地把它们分成很多部分……

……有序地启动我的思维，从最简单的事物，也即最容易了解的事物出发，循序渐进，一步一步直达对最复杂事物的认知……

……进行如此完整的描述和如此全面的回顾，我理应保证其中无一遗漏。

笛卡尔，论方法，1637

(René Descartes, Discours de La Méthode, 1637)

本书旨在建立一种协调合理的、有科学依据的方法，可用来对土木工程不可或缺的混凝土混合料进行配合比设计，当与我们的前辈（René Féret 和 Duff Abrams 以及较近代的颇有建树者）所面临的情况相比时，下述事实已经使配合比设计的问题实质有了变化，而本书已尝试着对这些事实做了考虑。

- 混凝土再不是仅由骨料、波特兰水泥和水所制成的了。如果不是总是，那也是经常地要在混凝土中至少加入下列产品之一：有机外加剂、附加的胶凝性材料、纤维等。

- 如今的混凝土必须满足一揽子综合性的要求，这些要求不再局限于最终的抗压强度，而是包含了流变性、变形性以及各种耐久性在内的多种要求。

- 至于所要求的各种性能，在过去的几年里，其可达范围已奇迹般地得到

扩展。例如：无坍落度混凝土和自密实混凝土都能投入使用。28 天抗压强度在一些水坝大体积混凝土上可低至 10MPa，而在一些特殊的预制件上可高达 200MPa 以上。

- 纯粹试验性和经验性的优化过程越来越难以成功，这是因为所牵涉到的参数数目很大（输入和输出两方面），这类研究中的人力耗费很高，以及属于工业社会特征的经济和时间上的一些限制也不少。

但是，除了这些负面情况之外（就混凝土优化的难易而言），所幸还有一些正面的情况。

- 混凝土技术不再是一门年轻的技术，自从 21 世纪开始以来，已经公开发表了数量庞大的试验数据，可加以综合开发利用。Adam Neville 在他那部著作的最新版本中，对这类文献已经做了一个独有的综述。

- 计算机的发展有助于研究者处理、掌握大量的试验数据。根据这些数据，他可以发现那些着重描述混凝土系统各种行为的物理性规律，在与数据库连接后，又可把它们转述成半经验的数学模型（Kaëtzl 和 Clifton, 1995）。

- 一旦这些模型做成有用户支持的软件，操作者即使对此系统的高度复杂性只具备有限的知识，也可以很容易地使用它们。这样，就可以对一些生产性的问题快速提出优化对策。在现有的发展阶段上，虽然实验依然是必需的，但是软件却能允许配制者奇迹般地削减试验的次数，更好地抓住实验方案的要点，并尽可能地利用好那些新产生的数据。

在这些陈述的基础上，本书的目标有两个方面：（1）建立简化模型，将混凝土组成与其性能联系起来，使有可能得到优化问题的解析性解答，展示所观察到的主要规则和趋势，更好地理解混凝土系统。（2）建立综合性和复杂性较强的模型，令其既能在软件中被方便执行，又能在实践中被用来设计那些有实际用途的真材实料的混凝土。

混凝土设计的主要问题是一个堆积问题。所有现存的方法，或是主张对一些组分的堆积参数进行测算（ACI 211），或是对那些被假定在实际材料上可导致最大密实的“理想”级配曲线做出近似，都默认这种说法。值得一提的是，所有这些学者提出的曲线（或系列曲线）都是不同的，这会令人对这一概念的完整性产生怀疑。本书第 1 章详述了由作者及其同事历经 12 年研究的努力而提出的一种理论。就作者所知，在问题的一般性范围中，可用来解决干性混合料堆积密实度问题的、而又具有有效的实用精度的理论，这尚属第一个。这个理论与绝大多数经典性的结果相符，并且表明了骨料各粒级的一个给定组合的理想配比不但取决于级配曲线，而且还取决于每种颗粒粒级，包括细颗粒的堆积能力。

第 2 章专用以分析混凝土组分与混凝土性能之间的种种关系。或是在新拌

混凝土中考察固相材料的总范围，或是在硬化混凝土中考察骨料的骨架体系，所提出的模型都会经常涉及堆积的各种概念。虽然大多研究的是工程性质，但也以少量篇幅强调了耐久性。这并非因为这个课题不重要，而仅因为目前还几乎得不到既能在大范围上涵盖各种混凝土，又能与真实材料的有关耐久性相关的各种数据。

第3章以前面提出的模型，罗列了控制混凝土性能的一些性能构成。值得指出的是，如果与那些妨碍混凝土有关研究的庞大的参数积累相比，这罗列还是很有限的。

第4章展示了如何使用第2章提出的模型，是本书的核心。在简化模型的帮助下，优化的问题首次通过解析的方法得到了解决。这一方法定性地突显出混凝土系统最重要的一些方面。然后，通过运用一些完整的模型，以及含一个优化模量的电子计算表格，提出了更为精确的一种方法（解算装置）。借助数值模拟，讨论了一些与配合比设计有关的一般性问题，并且还对现存的经验方法做了评论性的考察。

第5章陈述了所提出的各种方法在一系列生产性问题上的大量应用。这里要说明的是，本书提出的是一个应用于任何胶凝性粒状材料的概念性框架，包括各类砂浆、碾压混凝土以及喷射混凝土。对高性能混凝土，虽然本章给予了特殊的强调，但也论证了同一方法恰又可用于十分普通的“日用商品”混凝土。混凝土的实际配方，以及所测各性能在被列出的同时，还与按相同规范取得的模型预测值进行了比较。

在结论中，我们强调了改进这些模型的研究要求。显然，耐久性领域是一个值得尽最大努力的领域。工程师们最终必须能按给定环境下给定的结构年限设计出混凝土。今天我们还远落后于这个目标，一些模型过于经验性，这也是公认的，因为，在一些问题上依然缺乏科学基础，使得外推法有时显得很冒险。但是，笔者的辩护是，尽管一个工程师必须尽其所能，以最合适的方法解决问题，不过，将来的研究应该把目标放在尽可能多地减少经验主义所起的作用上。

有关本书的实践应用，在附录一里，我们提供了一张流程图，它使我们有可能会在软件中来执行各类模型计算。同时它还简要地表明了所陈列的这些概念不但可用来设计新的混合料，而且还可用于质量控制的目的。在一个工业性的生产过程中，由于原材料是连续变化着的，所以混凝土系统应保持活动的状态，自适地提供尽可能稳定的产出物（Day, 1995）。这或许是今天的混凝土工业最复杂的问题之一，比得上产生一批新型而“奇特”的配方了。

本书不是一种有关技艺的陈述，即不是一种现存的和业已发表过的知识的汇编。它含有一些基本属原创性的发现，是由笔者和他的同事们在巴黎的

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées（道路桥梁中心实验室）里获得的。在那里，笔者有机会在优越的科学环境中度过了 12 年，并通过地区性的“Ponts et Chaussées”实验室的互联网，接触到那个“真实的混凝土世界”。本书的这种研究方法试图超越现行技术。然而，呈现在其中的一些观点看法却常常是属于个人的，而笔者的希望正是愿这本书能帮助把这些观点公诸于国际科学技术界的同行们。

最后，要向土木工程师们做的评述是：这本书所含有的化学内容（如果有的话）是极少的（这个评述既可被看成是否定的，也可被看成是肯定的，完全取决于读者的个人背景）。虽然，笔者并非一名化学家是其一部分原因，但是，我们所面对的混凝土配合比设计的水平尚处在一个将各组成集合起来的层次上，却同样也是其一部分原因。本书中，我们把与各组成相有关的实际情况设为前提，而只研究它们在混凝土中的各种结果。但是，笔者却意识到，如果可比性的方法扩展到所有的耐久性方面，那么，我们就将需要更多的化学知识。

F. de Larrard

Bouguenais, 1998. 1

谢 词

我要向许多人士深表谢忱，如果没有他们，也就没有这本书问世的可能。

- 两个我有幸忝居其研究员之列的研究所（道桥中心实验室，巴黎/南代尔；国家标准技术所，盖瑟斯堡，是 Maryland 盛情邀请我作为客座研究员的，时间从 1996 年的 9 月到 1997 年的 6 月）。

- 在本书的写作过程中，所有关注我们研究工作的，并以此支持过我们的人们：我们的产业伙伴、我们的学生以及参加过我为之奉献达 10 年之久的许多混凝土训练科目的实践操作者。

- 在与本书有关的科学探索中，作为合作研究者共同参与其事的所有朋友：Paul Acker, Daniel Angot, Chiara F. Ferraris, Chong Hu, Ali Kheirbeck, Pierre Laplante, Robert Le Roy, Jacques Marchand, Thierry Sedran, Tannie Stovall, Patrick Tondat, Vincent Waller。

- 所有极具善意的我的那些同事，他们为了模型的标定/证明，把一些他们尚未发表过的数据资料提供给我：François Cussigh, Pierre Laplante, Gilbert Peiffer, Paul Poitevin, Thierry Sedran, Erik Sellevold。

- 所有在手稿的一些章节的修改中付出过时间和心血的我的那些同事：Mony Ben-Bassat, Dale Bentz, Nicholas Carino, Gilles Chanvillard, Jim Clifton, Clarissa Ferraris, Edward Garboczi, Geneviève Girouy, Robert Le Roy, Thierry Sedran, Vincent Waller。

- 最后是我的妻子和孩子们，是他们忍受着他们的丈夫/父亲数月来仅与他的计算机相依相伴而不是做着他们日常指望着他的那些事情的生活。

末了，谨以此书献给资深技师 Albert Belloc，在 LCPC，他以 39 年的时间经管着一支混凝土制作的团队，他以他的勇气和严谨，成为几代混凝土工艺师的楷模，并在许多与本书有关的原创性实验中发挥了主要的作用。同样，我

还要把这份敬意献给 LCPC 和其他实验室的全体实验师们，如果没有他们，就不能想像会有这些模型或理论。

读者须知：建议在运用这个配合比方法时，务请在试拌物上检验材料的各项性能。

目 录

1 粒状混合料的堆积密实度和匀质性	1
1.1 粒状混合料虚拟堆积密实度	2
1.1.1 无相互作用的二元混合料	2
1.1.2 完全相互作用的二元混合料	4
1.1.3 有部分相互作用的二元混合料	5
1.1.4 无相互作用的多元分散混合料	7
1.1.5 普适情况下多元分散混合料	9
1.2 实际堆积密实度——可压缩堆聚模型 (CPM)	10
1.2.1 密实指数和实际堆积密实度	10
1.2.2 二元混合料模型的标定	11
1.2.3 不同来源资料的有效性	20
1.3 边界条件对平均堆积密实度的作用	30
1.3.1 由于容器造成的附壁作用	31
1.3.2 纤维夹杂作用	34
1.4 最大堆积密实度的粒状混合料	36
1.4.1 一种简化的方法——Appolonian 模型	36
1.4.2 二元混合料	38
1.4.3 三元混合料	39
1.4.4 给定级配范围中优化的混合料	43
1.4.5 边界条件的作用	49
1.5 颗粒混合料的离析	50
1.5.1 一些实验事实	50
1.5.2 定量指南: 填隙图和离析势能	52
1.5.3 用可压缩堆聚模型模拟的一些例子	56
1.6 小结	61
2 混合物组成与混凝土性质的关系	63

2.1	新拌混凝土性能	63
2.1.1	新拌混凝土的流变行为	64
2.1.2	塑性黏度	72
2.1.3	屈服应力	80
2.1.4	Abrams 锥筒法坍落度	84
2.1.5	浇筑性	91
2.1.6	被俘入的空气	95
2.1.7	稳定性(泌水和分层的预防)	100
2.1.8	工作性的简化模型	106
2.2	绝热温度的升高	109
2.2.1	比热容	110
2.2.2	胶结材消耗的程度	111
2.2.3	水化热	115
2.2.4	绝热的温度上升	116
2.3	抗压强度	118
2.3.1	波特兰水泥的成熟浆体	118
2.3.2	水泥浓度对混凝土抗压强度的影响	122
2.3.3	颗粒型内含物:拓扑结构的影响	124
2.3.4	颗粒型内含物:岩石类型的影响 (de Larrard 和 Belloc, 1997)	128
2.3.5	强度发展和时间的关系	137
2.3.6	火山灰质外掺料的贡献	139
2.3.7	石灰石填料的贡献	144
2.3.8	小结:抗压强度的一般模型	149
2.4	抗拉强度	152
2.4.1	抗拉强度与抗压强度之间乘幂定律类型的关系	153
2.4.2	骨料类型的影响	155
2.5	硬化混凝土的变形性	156
2.5.1	硬化混凝土的二相特征:三重球模型	158
2.5.2	弹性模量	162
2.5.3	基本徐变	169
2.5.4	总徐变	174
2.5.5	自生收缩	176
2.5.6	总收缩	180
2.5.7	结论:配合比设计参数方面的变化对混凝土变形性	

的影响	188
2.6 影响混凝土渗透性的因素	189
2.6.1 渗透性和孔隙率	190
2.6.2 渗透性和抗压强度	191
2.7 小结：混凝土配合比设计需考虑的各种不同的颗粒系统	193
3 混凝土各组成：各相关参数	197
3.1 骨料	197
3.1.1 相对密度	197
3.1.2 孔隙率和吸水性	198
3.1.3 尺寸分布	199
3.1.4 剩余堆积密实度	199
3.1.5 弹性模量	201
3.1.6 对抗压强度的贡献	201
3.1.7 对抗拉强度的贡献	202
3.1.8 比热容	203
3.2 水泥	203
3.2.1 相对密度	203
3.2.2 级配曲线	204
3.2.3 掺外加剂和不掺外加剂时的剩余堆积密实度	205
3.2.4 鲍格组成	206
3.2.5 强度与时间	207
3.2.6 对自生收缩的贡献	208
3.3 矿物外掺料（附加性的胶凝材料）	209
3.3.1 相对密度	209
3.3.2 级配曲线	210
3.3.3 掺外加剂和不掺外加剂时的剩余堆积密实度	211
3.3.4 活性系数与时间的关系	213
3.4 塑化剂/超塑化剂	215
3.4.1 相对密度和干提取物	215
3.4.2 胶结料——外加剂双组分体的饱和曲线	216
4 混凝土拌和物设计	221
4.1 给定用途的混凝土技术规定	221
4.1.1 新拌混凝土性能	222

4.1.2	硬化中的混凝土性能	228
4.1.3	硬化混凝土性能	230
4.1.4	混凝土的长期性能	232
4.1.5	建立规定要求明细表的若干规则	234
4.2	拌和物设计问题的解法	236
4.2.1	分析解和总关系式	236
4.2.2	数值解: 上述关系的讨论	245
4.2.3	实际拌和物配合比设计过程	252
4.2.4	实例	255
4.3	关于骨料构架问题	262
4.3.1	骨料最大粒径 (MSA) 的选择	262
4.3.2	卵石骨料和碎石骨料	263
4.3.3	连续级配和间断级配混凝土	265
4.4	关于胶结料问题	269
4.4.1	石灰石填充料的应用	270
4.4.2	粉煤灰的使用	272
4.4.3	硅粉的应用	274
4.5	生产过程中的混凝土稳定性	277
4.5.1	设计最小变异性拌和物的策略	278
4.5.2	试验评估	279
4.5.3	模拟评估	281
4.6	借鉴现有方法考察若干标准方法	282
4.6.1	美国方法 (ACI 211)	282
4.6.2	英国方法 (BRE 1988)	286
4.6.3	法国方法 (Dreux 1970)	287
4.6.4	Baron 和 Lesage 方法 (法国)	290
5	应用: 各种系列的混凝土	293
5.1	初级模拟: 从普通强度混凝土至非常高强度混凝土	293
5.2	普通强度的结构混凝土	299
5.2.1	用于桥梁的 C40 混凝土	299
5.2.2	用于房屋建筑的 C25 混凝土	302
5.3	高性能混凝土	304
5.3.1	“基准”高性能混凝土	304
5.3.2	用于核电站的低热高性能混凝土	307

5.3.3	用于组合桥桥面的超稳定高性能混凝土	310
5.3.4	超高性能砂浆	312
5.4	使用特种浇筑方法的混凝土	314
5.4.1	碾压混凝土	315
5.4.2	喷射混凝土(湿法)	318
5.4.3	自密实混凝土	322
5.5	含特种组分的混凝土	326
5.5.1	轻骨料混凝土	327
5.5.2	高掺量粉煤灰混凝土	336
5.5.3	砂混凝土	338
结语		341
混凝土系统		341
一些研究需求		342
参考文献		344
符号一览表		356
附录一 拌和料模拟的程序框图		362
附录二 机构简称		365
索引		366