

混凝土科学

—有关近代研究的专论—

V.S.Ramachandran

[加拿大] R.F.Feldman 著

J.J.Beaudoin

黄士元 孙复强

译

王善拔 方承平

黄士元 校



中国建筑工业出版社

混凝土科学

—有关近代研究的专论—

V.S.Ramachandran

[加拿大] R.F.Feldman 著

J.J.Beaudoin

黄士元 孙复强 译

王善拔 方承平

黄士元 校

中国建筑工程工业出版社

本书在收集大量资料的基础上,对当代混凝土研究的最新进展作了述评。作者们试图把水泥及胶结材料中发生的物理、化学及力学过程作为认识混凝土特性的基础来加以阐述,有些章节的叙述是相当深入的,是一本从事水泥、混凝土科学研究及教学工作者的重要参考资料。

CONCRETE SCIENCE
TREATISE ON CURRENT RESEARCH
V.S. RAMACHANDRAN

R.F. FELDMAN

J.J. BEAUDOIN

Heyden & Son Ltd. 1981

* * *

混 凝 土 科 学

—有关近代研究的专论—

黄士元 孙复强 译

王善拔 方承平

黄士元 校

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

*

开本: 850×1168毫米 1/32 印张: 15¹/₈ 字数: 405 千字

1986年9月第一版 1986年9月第一次印刷

印数: 1—2,600册 定价: 4.35元

统一书号: 15040·4969(精)

译 序

混凝土是用量最大、最重要的建筑材料之一。混凝土是一种非匀质的多元的多孔复合材料，研究其组成和结构与特性的关系较为困难。因此，混凝土研究曾长期处于经验配方的阶段。新技术和精密测试方法的发展及其被引入混凝土的研究使混凝土研究逐步建立在近代科学方法的基础上。本书作者试图在水泥的物理、化学及力学的近代知识与混凝土的特性之间架设起桥梁，应该说本书在这方面作出了贡献，取得了成绩。据我所知，本书出版后在国际水泥和混凝土界得到了较高的评价。

本书的三位作者是加拿大国家科学院建筑材料研究组的主要研究人员。我于1981年4月访问了加拿大国家科学院建材组，他们给我详尽地介绍了他们的科研工作。因为这个研究组属加拿大国家科学院而不属企业领导，他们偏重于理论性研究，但却又十分重视理论性研究成果在生产中的应用，申请了不少专利。这个组在国际上有较高的声誉。当时，他们开阔的研究思路和精湛的试验技术给我留下深刻的印象。1982年初Ramachandran博士把刚从出版公司得到的这本《混凝土科学》寄赠给我。我仔细阅读后，认为此书值得翻译出来介绍给国内读者。

本书分十章，前面三章论述水泥浆体的组成和结构，是本书的理论基础。后面七章分别论述混凝土学中的几个近代最受重视的专题。作者查阅、引用和总结了大量，特别是最新发表的文献。作者在论述各专题时，在广为介绍最新研究成果的同时，又着重介绍他们自己的观点和研究成果。正由于此，读者可望从本书中得到许多最新的信息和研究思路方面的启发。

然而应该指出的，本书不是一本教科书，作者不大注意论述

的系统性和理论推导的逻辑性。有些重要的模型和理论叙述过于简单，使人不易读懂，某些内容又多处重复，使人感到繁琐。本书十章都是作者们曾进行过研究工作的领域，显然并没有包括混凝土学所有重要的领域。某些重要的领域，正是作者们没有进行过深入研究的领域如集料的界面问题、轻混凝土等基本上没有涉及，又如钢筋锈蚀问题等又嫌讨论不深。

正因为本书广采百家之言，书中引用的一些研究成果和结论并不一定都是千真万确的，许多问题都是正在探索、研究和发展中。我希望读者从此书中得到启迪，而又不囿于某些个别的结论。

参加本书翻译工作的有黄士元（第三、四、五、八、十章）、孙复强（第二、七章）、王善拔（第一、九章）和方承平（第六章）四位同志，黄士元负责总校。

我们在翻译过程中虽力求忠实原意，通顺易读，但深感由于学术水平和语言文字水平之限，许多地方译得不好，甚至难免有不少错误，恳望读者指正。在书末附有中英文对照的主题索引，一方面便于读者查阅，另一方面也便于核对专业词汇的翻译。

本书第一作者Ramachandran博士在1983年11月来武汉建材学院讲学时，曾与我讨论过有关本书的翻译事宜，并给予不少支持和方便，谨向他和两位作者表示我们深切的谢意。

我们谨向广大的水泥和混凝土科研工作者、混凝土工艺技术人员和大学中水泥、混凝土制品及无机非金属材料等专业的教师、研究生及大学生推荐此书。此书可用作上述这些专业的教学参考书。

黄士元

1984年6月于武汉

序

材料科学是建筑工艺的基石；它包括对建筑材料基本性能的认识及环境对它们使用性能的影响。在所有现代建筑材料中，混凝土是最老、用途最广的材料之一，但迄今又是认识最浅的材料之一。混凝土是一种人造材料，根据它的用途，运用适当的知识，能得到适合的性能。

本书的作者们曾是研究混凝土及其他多孔材料特性的小组成员，特别在研究水泥品种、水、外加剂及温度对水化过程、强度、微结构及耐久性的影响方面。这项工作需要新技术的发展和高度精密的方法，这些工作加深了影响混凝土物理—力学性能，包括表现性能的各种因素的认识。

最后，在作者们参与发展混凝土科学的基础上，他们有能力阐述认识这重要建筑材料的重大进展以及揭示这些认识又如何导致新材料的发展，包括外加剂、超塑化剂、纤维增强、浸渍系统、各种废料的利用。本书的出版不仅将帮助设计者去应用这些新材料，无疑还将有助于通过研究工作进一步发展这门知识。

加拿大国家研究院
建筑研究室主任
Carl.B.Crawford

前 言

在所有人造材料中混凝土的产量最大。与其他结构材料相比，混凝土具有许多优点：价格低廉，原材料易得，适应性大，能耗低，并可用于各种环境条件。因此在可见的未来，混凝土还将继续是主要的结构材料。

现有的大部分混凝土书籍大致可分为两类。水泥化学方面的书籍是熟料形成、水化化学及有关领域的信息的很好来源。而混凝土工艺方面的书籍则讨论应用方面的问题，侧重于生产过程及力学性能。现在还极少这样的书，把水泥及胶结材料中发生的物理、化学及力学过程的近代知识作为认识混凝土特性的基础。本书的主要目的是填补这方面的空白。混凝土这个题目涉及的领域如此宽广，以致不可能在一本书中包括所有的专题，因此不得不作一些舍弃。本书选择专题的原则是：现在大家关注的问题，侧重于最新的进展；以及作者他们自己进行过广泛研究的问题。

本书共分十章。第一章讨论微结构形貌（由电子显微镜看到的）、固相间的键、孔隙率、孔形状、表面积及密度与水泥浆体性能间的联系。

第二章阐述诸如断裂过程、应力集中、由荷重及湿度变化引起的外部尺寸的变化及时效等因素之间的相互关系，以及他们对抗压强度、杨氏模量、徐变及收缩的影响。在大部分情况下，这些性能都是通过水化水泥凝胶进行讨论的。

水对混凝土特性有重要影响，有关水在水泥浆体中的状态的知识，本质上解释了混凝土性能。第三章叙述了用于研究水的状态的各种技术，基于这些结果，发展了一种水泥浆体模型的概念。

北美的大部分混凝土都含一种或多种外加剂。与在工艺发展方面取得的惊人的进步相比,关于化学外加剂作用的细节,认识还是肤浅的。第四章讨论了在诸如减水剂、加速剂及延缓剂等外加剂的科学和应用方面取得的最新进展。

超塑化剂是一种新外加剂,化学上不同于其他外加剂,能减少需水量达30%。因此特设单独的一章——第五章来阐明有关超塑化剂在塑化作用、应用、对新鲜混凝土及硬化混凝土物理、化学及力学性能的影响方面的研究现况。

虽然纤维增强建筑材料的工艺可追溯到古代,在最近二十年来含玻璃、聚丙烯及碳纤维以及云母片的水泥复合材料的科学及应用重新引起兴趣。第六章包括对各种纤维增强系统的行为及理论的评介。

聚合物浸渍混凝土在许多用途方面是一种非常耐久的材料。第七章讨论了聚合物及硫浸渍的砂浆及混凝土的工艺性能,并描述了能用于预测浸渍体性能的模型及方程式。

节约能源、保护环境及合理使用能源推动了利用废料及副产品来生产水泥和混凝土的积极活动。在第八章对各种废料及副产品在混凝土生产中的应用及限制作了评述。

波特兰水泥混凝土及砂浆对若干特殊用途并不非常适合,因此特种水泥得到发展。第九章讨论了磷酸盐水泥、氧氯化镁及硫酸镁水泥、调凝水泥及高铝水泥的反应化学及性能。

对混凝土最重要的要求之一是混凝土在一定暴露条件下必须耐久。混凝土耐久性决定于其组分及暴露条件的严酷性。在第十章讨论了天然因素对混凝土作用的本质及后果,特别在下列方面:(a)碱-集料反应、(b)生物侵蚀、(c)含CaO及MgO水泥的体积不安定性、(d)冻结作用、(e)碳化收缩及(f)海水侵蚀。

本书是为科学工作者、工艺工作者及专业人员准备的。本书尤其应引起工程师、建筑师、混凝土工艺师、混凝土的生产者和使用者、水泥化学工作者、材料科学工作者及水泥和混凝土科学的高年级学生和研究生兴趣。

我们愿向渥太华加拿大国家研究院建筑研究室的下列人员表示我们的谢意；C.B.Crawford 主任，感谢他允许本书出版的善意；D.M.Naudain夫人，感谢她对一部分手稿漂亮的打字；绘图室的F.Crupi, J.D.Scott及Doreen Charron的高超的制图；绘图室的L.G.Smith及N.Nadon供给我们很好的照片；图书馆的S.A.Burvill小姐、A.D.Dunn夫人及J.E.Waudby-Smith夫人，他们在我们研究工作中不断地帮助我们得到有关文献。对速记服务社的H.S.Cuccaro夫人和她的同事为一部分手稿打印表示特别的谢意。

V.S.Ramachandran

R.F.Feldman

J.J.Beaudoin

1981年9月于渥太华

目 录

译序

序

前言

1 水泥浆体的微观结构	1
1.1 固相	1
1.1.1 显微镜技术观察到的微观结构	1
1.1.2 键的形成	4
1.1.3 绝对密度	9
1.2 非固相	11
1.2.1 孔隙率	11
1.2.2 孔分布	13
1.3 水力半径和表面积	21
1.3.1 孔系统	21
1.3.2 层间空间	23
参考文献	26
2 微观结构和强度发展	28
2.1 断裂过程	28
2.2 孔结构	30
2.3 固相结构	35
2.4 浸渍	39
2.5 时效 (Ageing)	41
2.5.1 干缩及湿胀	41
2.5.2 表面积、固相体积和密度	45
2.5.3 徐变	45
2.5.4 氧化硅聚合	55

参考文献	57
3 水泥浆体的微观结构: 水的作用	60
3.1 水泥浆体的组成和化学成分	60
3.2 水化波特兰水泥凝胶的模型	61
3.2.1 Powers-Brunauer模型	61
3.2.2 Feldman-Sereda模型	62
3.2.3 Munich模型	64
3.2.4 其他模型	65
3.3 层状结构的证据	65
3.3.1 X-射线及密度数据	65
3.3.2 干燥过程的氦流测试	66
3.3.3 再吸湿过程的氦流测试	66
3.3.4 核磁共振研究	67
3.3.5 吸附测试	67
3.3.6 水吸附及甲醇吸附引起的长度变化	67
3.3.7 杨氏模量随相对湿度的变化	68
3.3.8 低角度X-射线散射	68
3.4 水的作用: 用各种技术来阐明	68
3.4.1 吸附作用与长度变化现象: 理论上的依据	69
3.4.2 核磁共振	77
3.4.3 准弹性中子散射	80
3.4.4 低角度X-射线散射	82
3.4.5 氦流技术	84
3.4.6 水吸附与弹性模量	89
3.4.7 由热分析看层间水和吸附水的差别	92
3.5 结论	97
参考文献	98
4 化学外加剂	100
4.1 概述	100
4.2 减水利	101
4.2.1 一般性质	101
4.2.2 新鲜混凝土	108

4.2.3 硬化混凝土	114
4.3 加速剂	119
4.3.1 氯化钙与混凝土性能	120
4.3.2 加速作用的含意	125
4.3.3 加速机理	126
4.3.4 氯化钙的可能的状态	127
4.3.5 剂量	128
4.3.6 防冻作用	129
4.3.7 氯化钙与锈蚀	130
4.3.8 固有的本性	132
4.3.9 无氯化物混凝土	133
4.3.10 氯化物的测定	134
4.3.11 微结构形貌	135
4.3.12 氯化钙的替代物	136
4.4 延缓剂	140
4.4.1 标准	140
4.4.2 延缓剂的种类	140
4.4.3 应用	143
4.4.4 凝结时间	143
4.4.5 延缓剂的后掺	145
4.4.6 新鲜混凝土的其他性质	146
4.4.7 延缓机理	147
4.4.8 无糖木质磺酸盐	149
4.4.9 收缩	150
4.4.10 强度	150
4.4.11 抗冻耐久性	151
参考文献	152
5 超塑化剂	156
5.1 分类	157
5.2 塑化作用	157
5.3 流态混凝土	160
5.3.1 应用范围	161

5.4 新鲜混凝土	161
5.4.1 工作性	161
5.4.2 坍落度: 各种因素的影响	162
5.4.3 凝结性能	164
5.4.4 含气量	164
5.4.5 坍落度损失	165
5.5 硬化混凝土	166
5.5.1 强度	166
5.5.2 收缩及徐变	167
5.5.3 耐久性	167
5.6 高强混凝土	169
5.6.1 新鲜混凝土	169
5.6.2 硬化混凝土	171
5.7 结论	176
参考文献	177
6 纤维增强水泥	180
6.1 纤维-增强水泥的应用	181
6.2 纤维增强的原理	182
6.2.1 水泥复合材料中纤维的作用	182
6.2.2 纤维-水泥复合材料中的应力传递	184
6.2.3 纤维-纤维的相互作用	185
6.2.4 纤维的临界容量	185
6.3 纤维-增强水泥复合材料的力学性能	186
6.3.1 混合规则	186
6.3.2 破坏方式	187
6.3.3 有效系数	188
6.3.4 应力-应变曲线	192
6.3.5 断裂韧性	194
6.4 钢纤维增强的波特兰水泥复合材料	196
6.4.1 力学性能	196
6.5 玻璃纤维增强的水泥复合材料	211
6.5.1 力学性能	211

6.5.2 耐久性	215
6.6 掺加纤维与水泥浆体的微观结构	221
6.7 聚丙烯纤维增强的水泥复合材料	224
6.7.1 力学性能	225
6.8 碳纤维增强的水泥复合材料	227
6.8.1 力学性能	227
6.9 石棉纤维增强的水泥复合材料	228
6.9.1 力学性能	228
6.10 Kevlar纤维增强的水泥复合材料	231
6.10.1 力学性能	231
6.11 铝丝增强的水泥复合材料	232
6.11.1 力学性能	232
6.12 金属玻璃纤维增强的水泥复合材料	233
6.13 植物纤维增强的水泥复合材料	233
6.13.1 剑麻纤维	233
6.13.2 黄麻和椰纤维	233
6.13.3 Akwara纤维	234
6.13.4 竹纤维	234
6.13.5 芦苇、象鼻草、车前草和Musamba纤维	235
参考文献	235
7 浸渍系统	240
7.1 引言	240
7.2 聚合物浸渍砂浆和混凝土	240
7.2.1 应用	241
7.2.2 浸渍方法	241
7.2.3 聚合物浸渍砂浆及混凝土的力学性能	245
7.2.4 耐久性因素	253
7.3 硫浸渍砂浆和混凝土	254
7.3.1 浸渍技术	255
7.3.2 力学性能	255
7.3.3 耐久性	257

7.4 以聚合物和硫浸渍的水泥浆体	260
7.4.1 引言	260
7.4.2 孔隙率	260
7.4.3 浸渍剂	261
7.4.4 预测浸渍体性能的模型及公式	264
7.4.5 耐久性	279
7.5 混合律预测浸渍混凝土强度的有效性	283
参考文献	285
8 废料及副产品的利用	287
8.1 波特兰水泥混凝土	287
8.1.1 集料	288
8.1.2 波特兰水泥的掺合料或替代物	299
8.2 硫磺混凝土	313
8.2.1 硫的工程性质	313
8.2.2 硫磺砂浆及混凝土的工程性质	317
参考文献	325
9 特殊胶凝系统	329
9.1 磷酸盐水泥	329
9.1.1 磷酸盐粘结的形成	329
9.1.2 磷酸铵水泥	330
9.1.3 硅质磷酸盐水泥	333
9.1.4 六偏磷酸钠胶结材料	334
9.2 氧氯化镁水泥和氧硫酸镁水泥	335
9.2.1 氧氯化镁水泥	335
9.2.2 氧硫酸镁水泥	340
9.3 调凝水泥	342
9.3.1 调凝水泥的生产	342
9.3.2 调凝水泥、 $C_{11}A_7 \cdot CaF_2$ 、 $C_{11}A_7 \cdot CaF_2 + C\bar{S}$ 和 $C_{11}A_7 \cdot CaF_2 + C_3S + C\bar{S}$ 浆体在20°C 时的水化	343
9.3.3 力学性质	344
9.3.4 环境的影响	348

9.4 高铝水泥	348
9.4.1 高铝水泥的生产	349
9.4.2 熟料组成	349
9.4.3 水化	349
9.4.4 强度发展	350
9.4.5 转化反应	352
9.4.6 低水固比和强度	355
9.4.7 抗化学侵蚀性能	356
9.4.8 化学外加剂	357
9.4.9 耐火混凝土	359
参考文献	360
10 混凝土-环境作用	362
10.1 碱-集料反应	362
10.1.1 碱	363
10.1.2 碱-集料反应的类型	364
10.1.3 预防措施	369
10.1.4 试验方法	370
10.2 生物侵蚀	375
10.2.1 表面作用	375
10.2.2 地板的隆胀	376
10.2.3 混凝土的破坏	379
10.3 含MgO及CaO水泥的体积不稳定性	380
10.3.1 引起膨胀的因素	381
10.3.2 安定性的快速试验	382
10.3.3 高镁水泥的体积稳定性	386
10.4 冻结作用	388
10.4.1 理论	389
10.4.2 冻结作用的机理	400
10.4.3 抗冻性试验	402
10.4.4 混凝土抗冻性的改善	403
10.5 碳化收缩	404
10.5.1 引言	404

10.5.2	CO ₂ 与水化波特兰水泥的相互作用·····	405
10.5.3	收缩：湿度关系·····	406
10.5.4	碳化收缩的理论·····	409
10.6	海水侵蚀·····	412
10.6.1	引言·····	412
10.6.2	海水侵蚀的性质·····	412
10.6.3	化学过程·····	413
10.6.4	水泥组成及细度的影响·····	414
10.6.5	反应的顺序·····	415
10.6.6	混合水泥及其他水泥的使用·····	415
10.6.7	配筋混凝土的锈蚀·····	418
	参考文献·····	419
	主题索引（汉英对照）·····	424