

SIMPLIFIED SERIES OF
CIVIL ENGINEERING

清华大学土木工程系组编

丛书主编 崔京浩

王栋民 著

简明土木工程系列专辑

高性能膨胀混凝土



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

知识产权出版社
www.cnipr.com

Simplified Series of Civil Engineering

清华大学土木工程系组编

丛书主编 崔京浩

王栋民 著

简明土木工程系列专辑

高性能膨胀混凝土

中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



知识产权出版社
www.cnipr.com



内容提要

本书系“简明土木工程系列专辑”中的一本。本书在综述膨胀混凝土和高性能混凝土基本概念和基本原理的基础上,提出了高性能膨胀混凝土的概念。书中全面而系统地介绍了高性能膨胀混凝土的基本概念及基本原理、全计算配合比设计方法、力学性能及膨胀行为、水化机理及显微结构、在负温条件下的性能及机理,耐久性问题等,提出了高性能膨胀混凝土无缝抗裂设计方法,并介绍了在不同领域典型工程的应用。

本书可供从事土木工程和建筑材料专业科研、设计和施工的科研人员和高等院校有关专业的师生参考。

选题策划: 阳 淼 张宝林 E-mail: yangsanshui@vip. sina. com; z_baolin@263. net

责任编辑: 阳 淼 张宝林

文字编辑: 彭天放

图书在版编目(CIP)数据

高性能膨胀混凝土/王栋民著. —北京: 中国水利水电出版社, 2006

(简明土木工程系列专辑/崔京浩主编)

ISBN 7-5084-3416-1

I. 高... II. 王... III. 高强混凝土: 膨胀混凝土
—基本知识 IV. TU528

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 136148 号

简明土木工程系列专辑

高性能膨胀混凝土

王栋民 著

中国水利水电出版社 出版发行 (北京市西城区三里河路 6 号; 电话: 010-68331835 68357319)
知识产权出版社 北京市海淀区马甸南村 1 号; 传真、电话: 010-82000893

全国各地新华书店和相关出版物销售网点经销

北京市兴怀印刷厂印刷

850mm×1168mm 32 开 8.75 印张 235 千字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月第 1 次印刷

印数: 0001—4000 册

定价: 18.00 元

ISBN 7-5084-3416-1

版权所有 侵权必究

如有印装质量问题, 可寄中国水利水电出版社营销中心调换

(邮政编码 100044, 电子邮件: sales@waterpub. com. cn)

土木工程是一个历史悠久、生命力强、投入巨大、对国民经济具有拉动作用、专业覆盖面和行业涉及面极广的一级学科和大型综合性产业，为它编一套集新颖性、实用性和科学性为一体的“简明系列专辑”，既是社会的召唤和需求，也是我们的责任和义务。

新颖性——反映新标准、新规程、新规范、新理论、新技术、新材料、新工艺、新方法

实用性——深入浅出，让人一看就懂，一懂能用，不是手册，胜似手册

科学性——编写内容均有出处

——摘自《简明土木工程系列专辑》总序

清华大学土木工程系组编

简明土木工程系列专辑

编 委 会

名誉主编 陈肇元 袁 驷

主 编 崔京浩

副 主 编 石永久 宋二祥

编 委 (按汉语拼音排序)

陈永灿 胡和平 金 峰 李庆斌

刘洪玉 钱稼茹 王志浩 王忠静

武晓峰 辛克贵 阳 森 杨 强

余锡平 张建民 张建平

编 辑 办 公 室

主 任 阳 森

成 员 张宝林 董拯民 彭天赦 淡智慧

周 媛 莫 莉 丁 丁 张 冰

邹艳芳

总 序

国务院学位委员会在学科简介中为土木工程所下的定义是：“土木工程（Civil Engineering）是建造各类工程设施的科学技术的统称。它既指工程建设的对象，即建造在地上、地下、水中的各种工程设施，也指所应用的材料、设备和所进行的勘测、设计、施工、保养、维修等专业技术”。土木工程是一个专业覆盖面极广的一级学科。

英语中“Civil”一词的意义是民间的和民用的。“Civil Engineering”一词最初是对应于军事工程（Military Engineering）而诞生的，它是指除了服务于战争设施以外的一切为了生活和生产所需要的民用工程设施的总称，后来这个界定就不那么明确了。按照学科划分，地下防护工程、航天发射塔架等设施也都属于土木工程的范畴。

土木工程是国家的基础产业和支柱产业，是开发和吸纳我国劳动力资源的一个重要平台，由于它投入大、带动的行业多，对国民经济的消长具有举足轻重的作用。改革开放后，我国国民经济持续高涨，土建行业的贡献率达到 1/3；近年来，我国固定资产的投入接近甚至超过 GDP 总量的 50%，其中绝大多数都与土建行业有关。随着城市化的发展，这一趋势还将继续呈现增长的势头。

相对于机械工程等传统学科而言，土木工程诞生得更早，其发展及演变历史更为古老。同时，它又是一个生命力极强的学科，它强大的生命力源于人类生活乃至生存对它的依赖，甚至可以毫不夸张地说，只要有人类存在，土木工程就有着强大的社会需求和广阔的发展空间。

随着技术的进步和时代的发展，土木工程不断注入新鲜血液，呈现出勃勃生机。其中工程材料的变革和力学理论的发展起

着最为重要的推动作用。现代土木工程早已不是传统意义上的砖瓦灰砂石，而是由新理论、新技术、新材料、新工艺、新方法武装起来的为众多领域和行业不可或缺的大型综合性学科，一个古老而又年轻的学科。

综上所述，土木工程是一个历史悠久、生命力强、投入巨大、对国民经济具有拉动作用、专业覆盖面和行业涉及极广的一级学科和大型综合性产业，为它编写一套集新颖性、实用性和科学性为一体的“简明系列专辑”，既是社会的召唤和需求，也是我们的责任和义务。

清华大学土木工程系是清华大学建校后成立最早的科系之一，历史悠久，实力也比较雄厚，有较强的社会影响和较广泛的社会联系，组编一套“简明土木工程系列专辑”，既是应尽的责任也是一份贡献，但面对土木工程这样一个覆盖面极广的一级学科，我们组编实际起两个作用：其一是组织工作，组织广大兄弟院校及设计施工部门的专家和学者们编写；其二是保证质量的作用，我们有一个较为完善的专家库，必要时请专家审阅、定稿。

简明土木工程系列专辑包括以下几层含义：简明，就是避免不必要的理论证明和繁琐的公式推导，采用简洁明快的表述方法，图文并茂，深入浅出，浅显易懂；系列，指不是一本书而是一套书，这套书力争囊括土木工程涵盖的各个次级学科和专业；专辑，就是以某个特定内容编辑成册的图书，每本书的内容可以是某种结构的分析与计算，某个设计施工方法，一种安装工艺流程，某种监测判定手段，一个特定的行业标准等等，均可独立成册。

这套丛书不称其为“手册”而命名为“系列专辑”，原因之一是一些特定专题不易用手册的方法编写；原因之二是传统的手册往往“大而全”，书厚且涉及的技术领域多，而任何一个工程技术人员在某一个阶段所从事的具体工作又是对性很强的，将几个专业甚至一个项目的某个阶段集中在一本“大而全”的手册势必造成携带、查阅上的不方便，加之图书的成本过高，编写人员臃肿，组织协调困难，出书及再版周期过长，以致很难反映现

代技术飞速发展、标准规范规程更新速度太快的现实。考虑到这些弊端,这套系列专辑采用小开本,在选题上尽量划分得细一些,视专业、行业、工种甚至流程的不同,能独立成册的绝不合二为一,每本书原则上只讨论一个专题,根据专题的性质和特点有的书名仍冠以“手册”两字。

这套系列专辑的编写严格贯彻“新颖性、实用性、科学性”三大原则。

新颖性,就是充分反映有关新标准、新规程、新规范、新理论、新技术、新材料、新工艺、新方法,老的、过时的、已退出市场的一律不要。体现强劲的时代风貌。

实用性,就是避免不必要的说理和冗长的论述,尽可能从实用的角度用简洁的语言以及数据、表格、曲线图形来表述;深入浅出,让人一看就懂,一懂能用;不是手册,胜似手册。

科学性,就是编写内容均有出处,参考文献除国家标准、行业标准、地方标准必须列出以外,尚包括引用的论文、专著、手册及教科书。

这套系列专辑的读者对象是比较宽泛的,它包括大专院校师生,土木工程领域的管理、设计、施工人员,以及具有一定阅读能力的建筑工人。它既可作为土建技术人员随身携带及时查阅的手册,又可选作大专院校、高职高专的教材及专题性教辅材料。

崔京浩

2005年10月于清华园

崔京浩,男,山东淄博人。1960年清华大学土建系毕业,1964年清华大学结构力学研究生毕业,1986~1988年赴挪威皇家科学技术委员会做博士后,从事围岩应力分析的研究。先后发表论文150多篇,编著专业书4本,参加并组织编写巨著《中国土木工程指南》,任编辑办公室主任,并为该书撰写绪论;主持编写由清华大学土木工程系组编的“土木工程新技术丛书”和“简明土木工程系列专辑”,并任主编。曾任清华大学土木系副系主任,现为中国力学学会理事,《工程力学》学报主编,享受国务院特殊津贴。

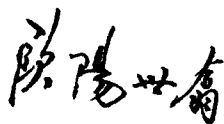
序

混凝土材料诞生至今已有 100 余年的发展历史，由于其良好的可塑性、耐久性和经济性而被广泛采用，成为迄今为止世界上最大宗的人造材料。但混凝土材料也存在一些弱点，如拉压强度比低，易收缩开裂等。如果在混凝土的拌和过程中引入膨胀组分，则在混凝土水硬化过程中产生体积膨胀，在钢筋和邻位的约束下这种膨胀将有效地补偿混凝土自身的收缩，大大提高混凝土的抗收缩开裂能力。我国从 20 世纪 50 年代，在已故著名材料科学家吴中伟院士的领导下就开始了膨胀混凝土的研究，70 年代研制成功不同类型的膨胀水泥，80 年代研制成功多种膨胀剂。以后又不断改进发展，完成了补偿收缩混凝土结构自防水、超长钢筋混凝土结构无缝设计和施工、大体积混凝土裂渗控制等多项重大应用技术成果的研究。吴中伟院士的《补偿收缩混凝土》、《膨胀和自应力水泥及其应用》、《膨胀混凝土》等专著的问世，标志着我国膨胀混凝土理论研究的成熟；年产量达 25 万 t 以上的 UEA（CSA）等多种膨胀剂的生产及由其配制的补偿收缩混凝土的施工，则标志着补偿收缩混凝土的普及和实用化。可以说，我国膨胀混凝土的理论研究和工程应用始终处于国际前列。

近 10 年来混凝土材料的研究向高性能混凝土（HPC）方向发展，不仅注重其高强度，同时要求具有良好的施工性和耐久性。在配制高性能混凝土时，通常均掺入了高效减水剂（超塑化剂）和超细矿物掺和料，由此实现了低水胶比、低水泥用量、低水化热和高性能。随着混凝土施工技术的发展，膨胀混凝土也进入到流态化、高强度、超塑化阶段，所用的胶凝材料趋向多元化，并广泛采用了泵送混凝土施工工艺，有的还实现了自密实施工。可见膨胀混凝土的发展已进入高性能混凝土的范畴，一方

面，在材料制备和施工方面均带有高性能混凝土的特征；另一方面，为了保证高性能混凝土的体积稳定性，在配制时也往往加入一些膨胀剂（膨胀组分）以补偿其收缩。膨胀混凝土和高性能混凝土的有机结合，形成了高性能膨胀混凝土（HPEC）这一新的学科分支。

本书作者王栋民教授长期致力于流态泵送混凝土、膨胀混凝土和高强高性能混凝土的应用基础研究和工程实践，在该领域取得了若干重要科研成果，拥有多项国家发明专利并多次获部级科技进步奖。近年来，王栋民教授专注于高性能膨胀混凝土的研究，他较系统地研究了高性能膨胀混凝土的力学性能与膨胀行为的协调发展问题、耐久性问题、组成与配合比问题等，获得了很多有价值的研究结果，并提出了一些有深度的、独到的见解，在一定程度上丰富了膨胀混凝土理论，为发展高性能混凝土材料科学与技术做出了积极贡献。本书是对高性能膨胀混凝土系统研究的成果总结。我很高兴能将本书推荐给各位同行，希望它的出版对我国水泥混凝土材料科学技术的发展和高性能膨胀混凝土的研究与工程应用起到有益的促进作用。

A handwritten signature in black ink, reading '王栋民' (Wang Dongmin) in a cursive style.

2005 年国庆于北京

前 言

1985~1988年,作者追随吴中伟先生攻读硕士研究生,期间接受了有关水泥基复合材料科学的系统的理论学习和严格而独立的科研工作训练,也初步接触和了解了膨胀混凝土。

1988年7月作者参加工作,进入我国建筑材料科学研究的摇篮——中国建筑材料科学研究院,在该院工作15年,直到2003年调入中国矿业大学。在中国建筑材料科学研究院工作的15年大致可分为三个阶段:化学外加剂和泵送混凝土研究阶段,膨胀剂和补偿收缩混凝土研究阶段,高性能混凝土研究阶段。刚到研究院时作者参加了由黄大能和吴兆琦领导的化学外加剂课题组,课题组为了满足日益增长的商品泵送混凝土的需要,主要研制开发系列的混凝土化学外加剂并进行相关应用技术研究。课题组研制成功国内第一种混凝土泵送剂,主持制定了泵送剂国家标准(后改为行业标准),完成了泵送剂对混凝土可泵性作用机理的行业基金项目,开发了系列混凝土化学外加剂。在项目初期,作者和姚燕被院里派到北京三联混凝土公司从事实验室技术工作数个月,期间积累了丰富的实践经验,使我们成为国内第一批对于商品混凝土行业既有理论知识又有实践经验的工程技术人员,也为作者后来较出色地完成上述标准和基金项目奠定了扎实基础,该项目后获建材行业部级科技进步二等奖。之后作者参加了游宝坤领导的膨胀剂课题组,课题组主要从事混凝土膨胀剂及其应用技术研究,在游宝坤教授带领下研制成功UEA膨胀剂,在全国建立了20多个工厂生产,年销量达到30万t的规模。课题组系统研究了膨胀混凝土的性能,开发了膨胀混凝土三大应用技术领域:结构自防水,大体积混凝土裂缝控制和超长钢筋混凝土结构无缝设计施工方法。这项工作以及其他国内同行相关的

工作使得我国在膨胀混凝土领域从数量、规模到水平均居世界前列。这些成果都是在吴中伟院士的领导和指导下完成的，反过来也从实践上验证了补偿收缩混凝土的基本理论。其中由作者主持完成的“超长钢筋混凝土结构无缝设计施工方法”获得国家发明专利，建材行业部级科技进步二等奖，并列入北京市重大科技成果推广计划，在包括北京首都机场新航站楼在内的全国 300 多项重大结构工程中取得成功应用。1995 年后高性能混凝土在我国快速发展，其原因在于流态泵送商品混凝土的普及、建筑工程对高强高耐久性混凝土需求的增加以及混凝土自身技术的进步。1997 年以后，由作者领导的高性能混凝土课题组对高性能混凝土进行了较专门的研究，与北京大学化学系合作研究开发了新一代的共聚羧酸（Copoca）超塑化剂系列产品并在实际工程中应用，与陈建奎教授在长期合作钻研的基础上在国内外率先提出“高性能混凝土全计算配合比设计方法”并获国内外同行认可，与企业合作开发成功新一代的低碱、低掺量的无水硫铝酸钙（CSA）膨胀剂、磨细矿渣高性能矿物质掺和料等。特别值得一提的是，作者提出了“高性能膨胀混凝土”的新概念并对其进行了较深入系统的研究，这是过去大量工作积累基础上的结晶产物。高性能混凝土由于对其自身体积稳定性的考虑，在配制时常要加入一些膨胀剂，向膨胀混凝土发展；而膨胀混凝土的发展趋势是流态化、高强度，在配制时也加入一些高性能矿物质掺和料，向高性能混凝土方向发展。这两个发展的共同走向是趋向于高性能膨胀混凝土。期间还在欧阳世翥教授指导下完成博士论文“高性能膨胀混凝土组成、结构与性能的研究”，从理论上对高性能膨胀混凝土进行了系统研究。

在过去的科研生涯中，特别是在“高性能膨胀混凝土”学术思想的形成、大量具体的科研试验以及本书的撰写过程中，得到了众多前辈专家、同辈学人、同事和学生的指导和帮助，也得到了中国建筑材料科学研究院和中国矿业大学领导和同事们的大力支持和帮助。按照时间先后顺序，谨向下列同志表示最真诚的谢

意：吴中伟、陈建奎、黄大能、吴兆琦、游宝坤、欧阳世翕、陈益民、姚燕、陈智丰、阎培渝、陈华辉、姜耀东、林震、张洪滔、李永鑫、张文生、郭随华、路新赢、左彦峰和金欣。特别值得提出的是：吴中伟院士在我读研的三年中及后来数十年科研工作中（特别是对膨胀混凝土的研究）都给了我很多的关心和具体的指导，本书一些重要内容的研究思想的形成与先生的指导是分不开的，在此对先生表示深深的怀念；与游宝坤教授共同工作的几年奠定了我对膨胀混凝土较扎实的研究与工程应用基础，为高性能膨胀混凝土的研究奠定了基础；与陈建奎教授最密切的合作结出硕果，也使我受益良多；欧阳世翕教授是我博士论文指导教师，他渊博的知识和开阔的思路帮助我对高性能膨胀混凝土的研究进行得更加深入，论文的撰写水平也得以提高，欧阳教授还热情地为本书的出版作了序；本书涉及的大量微观研究是在国家建材水泥基材料重点试验室完成的，研究工作得到首席专家陈益民教授以及林震高级工程师、张洪滔高级工程师、李永鑫博士、张文生博士和郭随华博士等的大力支持；唐山北极熊特种水泥有限公司副总经理陈智丰教授级高级工程师对于本研究工作以及本书的出版都给予了最大程度的关注和支持。感谢中国水利水电出版社阳森女士的得力策划和彭天赦先生的细心编辑，他们出色的工作使本书得以顺利出版。

高性能膨胀混凝土是混凝土材料科学一个新的学科分支，其提出时间还不长，研究工作还正在展开。希望本书的出版对于从事该领域研究和应用的同行以有益的启迪。作者水平有限，不当之处敬请读者批评指正。

作者

2005年10月

摘 要

高性能混凝土 (HPC) 是 21 世纪混凝土技术的发展方向和混凝土材料的研究热点。本书通过对 HPC 的深入认识, 给出了 HPC 的组成-性能关系图。在此基础上建立了普遍适用的更精确的混凝土体积模型, 提出了“干砂浆体积”概念, 同时吸收国外关于最佳浆集比概念, 用数学方法推导建立了混凝土用水量和砂率的计算公式。

用水量公式:

$$\begin{aligned} W &= V_w \\ &= \frac{V_c - V_a}{1 + \frac{1}{\rho_c(1-\phi) + \rho_f\phi} \left(\frac{f_{a,p}}{A f_a} + B \right)} \\ &= \frac{V_c - V_a}{1 + \frac{C+F}{[\rho_c(1-\phi) + \rho_f\phi] V_w}} \end{aligned}$$

砂率公式:

$$S_p = \frac{(V_s - V_c + V_w)\rho_s}{(V_s - V_c + V_w)\rho_s + (1000 - V_s - V_w)\rho_g} \times 100\%$$

这两个公式结合传统的水胶比定则 (保罗米公式), 即可全面定量地确定混凝土的所有组成材料的用量, 实现混凝土的全计算配合比设计。该方法不仅适用于 HPC, 也适用于其他混凝土, 因而具有普适性。

本书提出高性能膨胀混凝土 (HPEC) 概念, 认为 HPEC 是膨胀混凝土 (EC) 和 HPC 发挥各自优势的有机结合。本书系统研究了 HPEC 砂浆和 HPEC 混凝土的强度性能、膨胀性能以及膨胀与强度发展的协调性。对 HPEC 砂浆的研究表明, 限制膨胀率随膨胀剂 CSA 掺量的增加呈抛物线形式递增, 存在一个合适

的 CSA 掺量范围（一般为 6%~12%），在该范围内 HPEC 砂浆限制膨胀率可高达 $5 \times 10^{-4} \sim 10 \times 10^{-4}$ ，且保证强度不下降，这就为设计不同膨胀能级膨胀混凝土而又保证混凝土强度等级提供了空间。在 HPEC 砂浆中掺入磨细矿渣（BFS）或粉煤灰（FA），试件限制膨胀率有所下降，CSA 掺量越高，掺 BFS 或 FA 后限制膨胀率下降幅度越大。所以体系中掺加 BFS 或 FA 后要保持限制膨胀率不变，应适当提高 CSA 的掺量；而当 CSA 掺量过大时，BFS 或 FA 的掺入可抑制由于过度膨胀所造成的结构破坏。对 HPEC 混凝土的研究发现，与普通膨胀混凝土相比，高强流态膨胀混凝土的膨胀性能表现出明显的特殊性，在不掺超细矿物质掺和料（磨细矿渣）时，高强流态膨胀混凝土标准养护 1 天时出现自收缩，14 天时其限制膨胀率不到相同 CSA 掺量的中强流态膨胀混凝土限制膨胀率的一半，表现为膨胀效应受到更大限制。高强流态膨胀混凝土掺入磨细矿渣（等量替代水泥）后，标准养护 1 天未出现自收缩，14 天的限制膨胀率明显高于未掺磨细矿渣的高强流态膨胀混凝土的对应值。与此相反，具有较高限制膨胀率的中强流态膨胀混凝土在掺加超细矿物质掺和料（粉煤灰）后，限制膨胀率减小。CSA 掺量越高，减小幅度越大。上述看似矛盾的现象源于膨胀混凝土的膨胀与强度的协调性：高强流态膨胀混凝土的高强度，特别是较高的早期强度限制了膨胀效应的发挥，在混凝土内部存在“自约束效应”。磨细矿渣的加入使高强膨胀混凝土的早期强度降低，膨胀效应得以较充分发挥，所以加入磨细矿渣的高强混凝土显示出较高的膨胀率。中强流态膨胀混凝土的膨胀与强度性能发展比较协调，粉煤灰的加入降低了早期强度，使更多的膨胀变为无效膨胀消耗在仍处于塑性状态的混凝土中，混凝土限制膨胀率减小。本研究揭示了“强度增长应与膨胀效应的发挥协调进行”这一膨胀混凝土的基本观点对于 HPEC 仍然适用且更为重要，只有这样，HPEC 才能充分发挥其优良的膨胀密实特性。

HPEC 优良的宏观性能源于其合理的材料组成与微观结构。

采用 XRD、DTA/TG、SEM/EDS 和 MIP 等多种微观测试手段研究了 HPEC 胶凝材料的水化过程、水化机理和硬化水泥石的亚微观结构。研究表明：水泥—CSA—细掺料所组成的三元复合胶凝材料的水化反应和水化过程分阶段、分层次进行，具有高水化活性的水泥、具有高膨胀性的膨胀剂和具有良好微细颗粒级配和潜在反应活性的细掺料，在各自进行水化反应过程中又相互作用，最终的水化产物主要为高强致密的低钙硅比的 C—S—H 凝胶和具有三维空间结构的针柱状钙矾石晶体 [部分为凝胶状钙矾石，片状结构的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 被减到最少]，这种凝胶状物质与针柱状晶体物质在约束（限制）条件下的相互穿插和紧密结合，使体系形成一个低孔隙率、小孔径和优良的孔径分布（大孔比例小、小孔比例高）的理想网络结构。这种结构被认为是无机胶凝材料体系中一个理想的结构模型。

本书首次对膨胀混凝土在负温条件下的膨胀性能、强度性能及在负温条件下的水化机理和硬化体的显微结构进行了研究和论述，认为：膨胀混凝土在负温条件下养护时仍然能够发生水化反应，但水化速度要低于常温条件。其水化特征是：水泥的水化速度减慢，膨胀剂的水化速度也减慢，如果组成适当，二者的水化反应可协调进行。表现在宏观上，强度随负温下的水化反应而较缓慢增长，限制膨胀率也有一定发展；负温转正温后强度以较快速度上升接近标养值，限制膨胀率也呈较大幅度增长。本试验中的所有试块在负温养护及在负温转正温养护过程中均未出现开裂现象，说明各种膨胀剂在整个养护过程中的膨胀效应和强度发展具有协调性。不同膨胀剂的性能存在差异，CSA 膨胀混凝土的负温强度与膨胀率均优于同条件下的 CEA 膨胀混凝土，也优于复掺 CSA 和 FA 的混凝土。在冬季施工中，应优先选用 CSA 并控制粉煤灰的加入量，同时加强保温保湿养护。XRD、DTA/TG 微观测试显示 CSA 的水化速度较 CEA 快，对水泥水化又有促进作用，甚至在复掺粉煤灰时体系水化反应程度仍然高于单掺 CEA 的情况。MIP 研究表明，负温下膨胀混凝土的孔隙率提高，

特征孔径增加,孔径分布中大孔所占比例提高,一般从10%左右提高到25%~40%。负温下养护对膨胀水泥石的结构形成不利,其孔结构变差。转正温养护后在很大程度上可得到恢复。

高耐久性是 HPC 的一个重要特征。本书从氯离子在 HPEC 中的扩散、HPEC 胶凝材料与集料的界面结构以及 HPEC 胶凝材料的水化热等三个方面,研究论述了高性能膨胀混凝土的耐久性。研究表明:在 HPC 中掺加膨胀剂、硅灰、粉煤灰和磨细矿渣等掺和料均可降低氯离子在 HPC 中的扩散,其降低效果以硅灰为最优;在 HPC 中复掺膨胀剂和粉煤灰或膨胀剂和磨细矿渣后,其降低效果甚至优于单掺硅灰,但成本则远低于硅灰。复掺膨胀剂和细掺料的 C40 混凝土,其氯离子扩散系数低于空白的 C60 混凝土以及单掺膨胀剂、磨细矿渣或粉煤灰的 C60 混凝土。复掺膨胀剂和细掺料可制备超高抗渗性能的混凝土。与普通混凝土相似,HPEC 的各试样中,在胶凝材料与集料界面区也均发生了 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体的富集和取向,由界面晶体取向指数 R ($R = [I(001)/I(101)]/0.74$) 计算可见,纯水泥浆的界面结晶取向性最强 ($R=3.0$),加膨胀剂 ($R=1.53$)、硅灰 ($R=1.15$)、磨细矿渣、粉煤灰后,以及复掺膨胀剂和细掺料(磨细矿渣或粉煤灰)后均有较大幅度降低。 AFt 在界面处也有富集现象,但不存在取向。与中强混凝土相比,高强混凝土的界面结构有所改善,复掺 CSA 和细掺料后还可进一步优化。HPEC 三元复合胶凝材料的水化热绝对温升较纯水泥和二元复合胶凝材料明显下降,温峰出现时间延长,水化热特别是早期水化热大幅度降低,是配制低水化热、高耐久性混凝土的理想胶凝材料。

本书最后在 HPEC 性能和机理研究的基础上,从应力和应变的角度论证了 HPEC 无缝抗裂设计的可行性,提出了 HPEC 无缝抗裂设计的实用化方法,并介绍了在若干典型工程中成功应用的实例。

关键词: 高性能混凝土,膨胀剂,钙钒石,磨细矿渣,耐久性