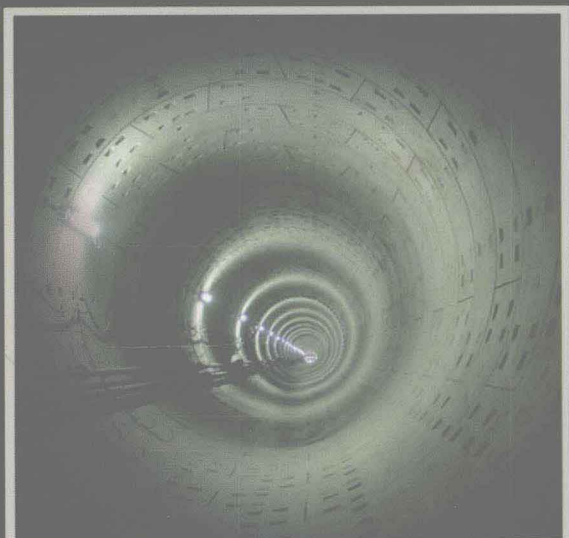




高性能 混凝土的体积变形 及裂缝控制

Volume Stability and
Crack Control of High Performance Concrete

姚燕 著

中国铁道工业出版社

国家自然科学基金重点项目 (编号: 50438010)

国家重点基础研究发展计划 (973计划) 项目 (编号: 2001CB 610700)

国家重点基础研究发展计划 (973计划) 项目 (编号: 2009CB 623100)

联合资助

国家自然科学基金重点项目(编号: 50438010)

国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(编号: 2001CB 610700) 联合资助

国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(编号: 2009CB 623100)

高性能混凝土的 体积变形及裂缝控制

姚燕 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

高性能混凝土的体积变形及裂缝控制/姚燕著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2011.1

ISBN 978-7-112-12842-6

I. ①高… II. ①姚… III. ①高强混凝土-体积变化-研究②高强混凝土-裂缝-控制-研究 IV. ①TU528.31

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 009384 号

责任编辑: 郑淮兵

责任设计: 赵明霞

责任校对: 张艳侠 赵 颖

高性能混凝土的体积变形及裂缝控制

姚 燕 著

*

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

北京建筑工业出版社印刷

*

开本: 787×960 毫米 1/16 印张: 19½ 字数: 380 千字

2011 年 2 月第一版 2011 年 2 月第一次印刷

定价: 46.00 元

ISBN 978-7-112-12842-6

(20108)

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)

序

人们通常把信息、材料和能源誉为现代文明的三大支柱。材料是人类赖以生存和发展的物质基础，材料的进步与国家的经济发展、国防建设和人民生活水平和质量的提高都密切相关。

建筑材料是材料大家庭的重要成员，而混凝土材料又是建筑材料的重要组成部分。经过一百多年的发展，混凝土材料已成为城市、乡镇、公路、桥梁、港口码头、机场、大坝、隧道、地下工程、海上海下工程等建设工程中应用最广、使用量最大的建筑材料。现代经济、工业和科技的发展与混凝土材料的发展相互促进。混凝土材料向着复合、高强和高性能的方向发展。高性能混凝土材料的研究和应用是国内外材料和工程界近几十年研究的热点课题之一。

旧中国对混凝土材料的研究几乎处于空白，中国建材总院在新中国成立以后组织起了新中国的第一支混凝土科学研究队伍，开始研究混凝土材料，并在国内首次提出“混凝土科学”的概念。经过几代人的不懈努力，使我国混凝土材料的研究和应用处于国际先进水平，为我国的经济建设和建筑材料工业的技术进步作出了重要贡献。

近十几年来，以中国建材总院姚燕教授为带头人的学术团队，先后承担了国家自然科学基金重点项目“混凝土结构裂缝的形成与发展机理及控制技术研究”、国家重点基础研究发展计划（973 计划）项目“高性能水泥制备和应用的基础研究”、“水泥低能耗制备与高效应用的基础研究”等，全面系统地研究了混凝土体积变形和裂缝形成的机理及控制技术，发表相关科技论文近百篇，培养研究生 9 名，使我国在混凝土体积变形和裂缝形成机理及控制领域处于国际先进水平。

《高性能混凝土的体积变形及裂缝控制》一书是姚燕教授及其所领导的研发团队多年来在混凝土体积变形和裂缝控制技术和应用领域研发成果的系统总结。该书搜集和整理了国内外大量资料，通过分析高性能混凝土原材料的组成特点，深入研究了各种原材料对其体积变形的影响，提出了多种裂缝控制措施并成功地应用于工程之中，具有较高的学术水平和应用价值。

我相信《高性能混凝土的体积变形及裂缝控制》一书的出版发行必将对于我国混凝土材料的研究和应用起到良好的指导作用，对相关研究和工程人员水平的提高也具有很好的参考价值。

师昌绪

2010 年 12 月 28 日

前 言

20 世纪 90 年代初出现的高性能混凝土具有诸多性能特点,如优良的工作性、好的体积稳定性、高的耐久性,以及显著的技术、经济、社会和环境效益,因而成为国内外工程界研究的热点。中国建筑材料科学研究总院自 1995 年开始承担国家科技攻关项目、973 课题和国家自然科学基金项目等多个高性能混凝土技术的研究和应用项目,对材料、性能和结构之间的关系研究深入,在高性能混凝土领域取得了丰硕的研究成果和丰富的实践经验。

在进入 21 世纪以后,跨海大桥、高速铁路、煤矿矿井、高层建筑等工程中越来越多地应用高性能混凝土,对其体积变形和裂缝控制技术进行研究成为学术界的焦点。从 2001 年 1 月至今,中国建筑材料科学研究总院先后承担了国家自然科学基金重点项目“混凝土结构裂缝的形成与发展机理及控制技术研究”(基金项目编号:50438010)、国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目“高性能水泥制备和应用的基础研究”(编号:2001CB 610700)、国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目“水泥低能耗制备与高效应用的基础研究”(编号:2009CB623100)的研究,负责这些项目中原材料对混凝土体积变化和裂缝形成的影响机理及控制技术研究。全面完成研究内容,发表相关研究论文近百篇。本书作者是这些课题的负责人,培养近 10 名研究生开展相关领域的研究。

本书是在这些研究成果的基础上,汇总作者及研究团队(研究生马丽媛、吴浩、朱鹭佳、高春勇、李清海及王玲教授、赵顺增教授、文寨军教授等)10 年来在高性能混凝土的体积变化和裂缝控制方面的成果撰写而成,既有理论研究,也有实际工程裂缝控制的范例。第 1 章介绍高性能混凝土及体积变形、收缩、开裂的特点;第 2 章到第 5 章分别分析水泥、矿物掺合料、减水剂、减缩剂、高效能混凝土膨胀剂等原材料对混凝土体积变化及裂缝形成机理的影响;第 6 章介绍对水泥基材料高温体积变形的研究成果;第 7 章介绍取得专利的混凝土体积变形和开裂研究新方法和新设备;第 8 章介绍了成功控制混凝土开裂变形的 7 个工程实例。

本书是中国建筑材料科学研究总院在高性能混凝土体积变化和裂缝控制方面成果的集成,也引用了大量学者的观点,并尽可能标注了文献出处。对于未标注的引用,也请给予谅解。

由于原材料品种和性能的不断发展,高性能混凝土裂缝控制技术研究也在不断深入之中。编写成书的目的是为了加强与国内外同行的系统交流,希望能抛

砖引玉，加深同行们对高性能混凝土体积变形和裂缝控制技术的探究，共同为各类工程使用高性能混凝土且“不裂”做出努力。

由于作者水平有限，缺憾乃至错误之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

中国建筑材料科学研究总院

姚 燕

2010 年 12 月

目 录

序
前言

第 1 章 高性能混凝土及其体积稳定性	1
1.1 高性能混凝土及其发展	1
1.1.1 高性能混凝土的概念	1
1.1.2 高性能混凝土在我国的研究和应用情况	3
1.2 高性能混凝土的组成及水化结构	10
1.2.1 高性能混凝土的组成	10
1.2.2 高性能混凝土的水化结构	12
1.3 高性能混凝土的收缩	18
1.3.1 塑性收缩	18
1.3.2 自收缩	25
1.3.3 干燥收缩	28
1.3.4 温度收缩	37
1.3.5 碳化收缩	39
1.4 高性能混凝土收缩与开裂控制	40
1.4.1 高性能混凝土收缩与开裂之间的关系	40
1.4.2 高流态高强混凝土收缩开裂的特征及影响因素	44
1.5 本章小结	54
参考文献	54
第 2 章 胶凝材料对高性能混凝土干燥收缩和水化放热的影响	58
2.1 胶凝材料体系的组成	58
2.1.1 水泥	58
2.1.2 矿物掺合料	61
2.2 胶凝材料体系的水化热及稳定性	67
2.2.1 胶凝材料体系的水化热	67
2.2.2 矿物掺合料的掺量限值	72
2.3 矿物掺合料对混凝土早期收缩开裂的影响	76
2.3.1 磨细矿渣粉对高强混凝土收缩开裂的影响	76

2.3.2	粉煤灰对高强混凝土收缩开裂影响的研究	81
2.3.3	硅灰对高强混凝土收缩开裂的影响	84
2.4	大体积薄壁结构高性能混凝土早期开裂控制技术	88
2.4.1	优化混凝土配合比	89
2.4.2	优化混凝土施工工艺	95
2.5	本章小结	99
	参考文献	99
第3章	减水剂对混凝土体积变形及裂缝形成机理的影响	101
3.1	减水剂的种类和发展	101
3.1.1	普通减水剂	101
3.1.2	高效减水剂	101
3.1.3	高性能减水剂	102
3.2	减水剂对水泥浆体干燥收缩性能的影响及机理分析	102
3.2.1	减水剂的掺量对水泥净浆干燥收缩性质的影响	102
3.2.2	减水剂种类对水泥净浆干燥收缩性质的影响	107
3.3	减水剂品种和掺量对混凝土干燥收缩性能的影响	110
3.3.1	混凝土配合比和性能	111
3.3.2	减水剂对混凝土性能影响的机理分析	113
3.4	高效减水剂对混凝土早期开裂性能的影响	118
3.4.1	混凝土配合比和试验结果	119
3.4.2	高效减水剂对混凝土性能影响的机理分析	121
3.4.3	高效减水剂对混凝土早期抗裂性能影响的机理分析	121
3.5	本章小结	123
	参考文献	123
第4章	减缩剂对水泥基材料收缩开裂性能影响的评价及机理研究	124
4.1	减缩剂的概况	124
4.1.1	减缩剂的发展	124
4.1.2	减缩剂的组成	125
4.1.3	减缩剂的发展方向	126
4.2	减缩剂对水泥水化结构形成与发展的影响	127
4.2.1	减缩剂对水泥水化初始结构形成的动力学分析	127
4.2.2	减缩剂对水泥水化结构发展影响的微观机理分析	131
4.3	模拟服役条件下减缩剂的减缩机理分析	139
4.3.1	表面张力影响因素的研究	140

4.3.2	掺减缩剂溶液与水泥石毛细孔壁接触性质的评价	143
4.4	温湿交变环境下掺减缩剂水泥石的体积变形	146
4.4.1	初次干燥	147
4.4.2	重新湿养护	150
4.4.3	二次干燥	153
4.4.4	温湿交变条件下水泥石体积稳定性评价	154
4.5	减缩剂对混凝土全周期开裂行为的控制	162
4.5.1	掺减缩剂混凝土早期收缩开裂研究	162
4.5.2	减缩剂对混凝土力学性能的影响	163
4.5.3	减缩剂对水泥基材料长期抗裂性能影响的探索性研究	165
4.6	本章小结	171
	参考文献	171
第5章	混凝土膨胀剂减少混凝土收缩裂缝的机理	173
5.1	混凝土膨胀剂的种类及其发展	173
5.1.1	混凝土膨胀剂的种类	173
5.1.2	混凝土膨胀剂的发展	174
5.2	膨胀和干缩的临界点	176
5.3	有效膨胀研究	180
5.4	可控膨胀速率原理	183
5.4.1	矿物成分对膨胀特征的影响	184
5.4.2	颗粒级配对膨胀特征的影响	186
5.5	干燥收缩落差研究	187
5.5.1	自由状态下的干燥收缩特点	187
5.5.2	限制状态下的干燥收缩特点	188
5.5.3	限制状态下减小干燥收缩落差的技术措施	190
5.5.4	干燥收缩落差原因浅析	191
5.6	干燥收缩开裂概率及其试验方法	192
5.7	本章小结	197
	参考文献	197
第6章	水泥基材料高温体积变形的研究	199
6.1	水泥石和集料的热膨胀性能及其对混凝土力学性能影响的研究	199
6.1.1	试验原材料	199
6.1.2	试验方法	201
6.1.3	集料热膨胀率的测定	202

6.1.4	水泥石热膨胀率的测定	204
6.1.5	热循环对混凝土力学性能影响的研究	211
6.1.6	水泥石和集料热膨胀系数数学模型的建立及计算	214
6.2	集料掺量对混凝土热膨胀性能及高温强度的影响研究	221
6.2.1	试验原材料	221
6.2.2	试验方法	222
6.2.3	集料掺量对混凝土热膨胀性能的影响研究	223
6.2.4	集料掺量变化对混凝土高温强度的影响研究	227
6.3	气相对水泥基材料热膨胀性能的影响研究	231
6.3.1	试验原材料	231
6.3.2	试验设计	232
6.3.3	引气剂对水泥基材料热膨胀性能的影响研究	232
6.3.4	引气剂对水泥基材料热膨胀性能影响的结果分析	233
6.4	水泥品种对水泥基材料热膨胀性能的影响研究	238
6.4.1	试验原材料	238
6.4.2	水泥品种对水泥基材料热膨胀率的测试结果	239
6.4.3	水泥品种对水泥基材料热膨胀率测试结果分析	240
6.5	本章小结	246
	参考文献	247
第7章	混凝土体积变形机理分析及性能测试新方法和设备	249
7.1	水泥石孔溶液与毛细孔壁接触角的测试新方法	249
7.1.1	Washburn 动态法测量接触角原理	249
7.1.2	Washburn 动态法的改进	250
7.1.3	测量装置的设计	251
7.1.4	减缩剂对水泥石接触性质的影响	252
7.2	数字图像处理技术在混凝土收缩开裂性能评价中的应用	253
7.2.1	数字图像处理技术的概述	253
7.2.2	图像采集装置的设计	253
7.2.3	数字图像处理软件的编写	255
7.2.4	收缩测试流程介绍	256
7.3	硬化水泥基材料热膨胀性能的差示评价方法	260
	参考文献	262
第8章	混凝土开裂变形控制工程实例	263
8.1	高铁无砟轨道板早强防裂混凝土配制	263

8.1.1	混凝土原材料	263
8.1.2	早强混凝土关键控制因素试验研究	264
8.1.3	混凝土防裂措施试验研究	268
8.2	深井煤矿早强防裂混凝土配制	269
8.2.1	深井冻结法施工介绍	269
8.2.2	矿井简介	270
8.2.3	C80 混凝土原材料选择	271
8.2.4	混凝土配合比和性能	272
8.2.5	施工效果	273
8.3	新型膨胀剂防裂混凝土配制实例 1	273
8.3.1	工程概况	273
8.3.2	补偿收缩混凝土技术方案	273
8.3.3	混凝土原材料及配合比	275
8.3.4	施工情况及效果	275
8.4	新型膨胀剂防裂混凝土配制实例 2	277
8.4.1	工程概况	277
8.4.2	原材料和混凝土配合比	277
8.4.3	施工措施及效果	279
8.5	矿物掺合料品种优选混凝土	280
8.5.1	工程概况	280
8.5.2	原材料	281
8.5.3	混凝土配合比	282
8.5.4	工程应用效果	282
8.6	三峡工程用中热水泥及高抗裂混凝土性能	285
8.6.1	工程背景	285
8.6.2	中热水泥性能研究及驻厂监理监测	286
8.6.3	中热水泥配制大坝用高抗裂混凝土	287
8.7	高贝利特水泥及高抗冻高抗裂混凝土的开发	289
8.7.1	高贝利特水泥 (HBC) 的性能	290
8.7.2	高贝利特水泥混凝土的性能	291

第 1 章 高性能混凝土及其体积稳定性

高性能混凝土（High Performance Concrete, HPC）是一种以耐久性为目标，兼顾强度、高工作性和高耐久性的混凝土，在节能、节料、工程经济、劳动保护以及环境等方面都具有重要意义，是一种环保型的新型材料，目前正在被越来越广泛地应用。由于材料组成和配比上的特点，高性能混凝土在体积变形方面具有突出的特点，这些特点与其配合比设计和工程应用性能密切相关。本章介绍高性能混凝土的概念及其体积变形的特点。

1.1 高性能混凝土及其发展

1.1.1 高性能混凝土的概念

混凝土的耐久性是指混凝土结构在自然环境、使用环境及材料内部因素作用下保持其工作能力的性能。使用环境中的气体、液体和固体通过扩散、渗透进入混凝土内部，发生物理和化学变化，多数情况下会导致硬化混凝土性能的劣化。发生严重的裂化后，常常影响到混凝土工程的寿命和安全性。以往工程中，习惯上只重视混凝土的强度，或片面强调或注重高强度而忽视混凝土的耐久性。曾有调查表明，国内一些工业建筑在使用 25~30 年后即需大修，处于严酷环境下的建筑物的使用寿命仅 15~20 年。许多工程建成后几年就出现钢筋锈蚀、混凝土开裂。

如何提高混凝土的耐久性与国民经济、社会安定、环境保护、可持续发展等问题密切相关，是混凝土材料科学的重大研究课题，也是工程界关注的重大科技问题。20 世纪 90 年代初出现的高性能混凝土的使用寿命能够使混凝土结构安全可靠地工作 50~100 年以上，是一种新型的高技术混凝土。高性能混凝土的概念是美国国家标准与技术研究所（NIST）和美国混凝土协会（ACI）1990 年 5 月在马里兰州盖瑟斯堡召开的会议上首先正式提出的。实际上，此前的一些重要工程中已采用了高工作性和高耐久性的高强混凝土。1998 年 ACI 给出的定义是：高性能混凝土是符合特殊性能组合和匀质性要求的混凝土，如果采用传统的原材料组分和通常的拌合、浇筑与养护方法，未必总能大量地生产出这种混凝土；下面所举的这些特性对某一用途来说可能是非常关键的：易于浇筑、振捣时不离析、早强、长期的力学性能、抗渗性、密实性、水化热、韧性、体积稳定性、恶劣环境下的较长寿命。

高性能混凝土针对混凝土结构所处的环境特点而进行相应的性能设计，并通过施工过程控制使得相应性能得到保证，能更好地满足结构功能要求和施工工艺要求，能最大限度地延长混凝土结构使用年限，降低工程造价。高性能混凝土是混凝土结构耐久性得以保证的重要措施之一。因此，在随后的近二十年中，高性能混凝土很快地被各国工程界所接受。主要是因为使用高性能混凝土对于各方都具有明显的效益：对于业主或用户来说，混凝土的耐久性好，安全使用期长，可减少维修费，保证安全；对于社会来说，高性能混凝土降低能耗、料耗，利用工业废渣、减少噪声污染，对环境有利，并消除不安全感；对于施工者来说，高性能混凝土操作方便，改善劳动条件，加快进度，减少模板和劳力，可提前交工；对于设计者来说，高性能混凝土减小断面，减轻自身重量，增加使用空间，有明显的节约效果，还能帮助建筑艺术和灵活性的实现。因此，高性能混凝土在不少工程中得以推广应用，如：高层建筑、海上石油钻采平台、桥梁工程、煤矿深井井筒等。随着人们逐渐重视工程质量、强调安全和环境保护，高性能混凝土真正进入推广应用时期。

目前，不同国家、地区和不同学者对高性能混凝土的涵义的理解和见解还不统一。我国已故吴中伟院士给出的定义是^[1]：高性能混凝土是一种新型高技术混凝土，是在大幅度提高普通混凝土性能的基础上采用现代混凝土技术制作的混凝土，是以耐久性作为设计的主要指标，针对不同用途的要求，对下列性能有重点的加以保证：耐久性、施工性、适用性、强度、体积稳定性和经济性。中国土木工程学会高强与高性能混凝土委员会提出的高性能混凝土的定义是：以耐久性与可持续发展为基本要求并适合工业化生产与施工的混凝土。近两年，清华大学廉慧珍教授和阎培渝教授根据高性能混凝土在工程应用中存在一些误区的情况，提出对“高性能混凝土”进行再认识。他们认为高性能混凝土不是一种具有明确组成或应用对象的混凝土，不能因为使用了某种特定的材料或具有特殊的功能，就将其称为高性能混凝土。高性能混凝土不是单纯在实验室里试配就能得到的，应通过贯穿混凝土生产与施工过程的质量控制来实现。虽然在实验室中配制出了性能很好的混凝土，但实际生产与施工过程的影响使其品质下降，这样的混凝土不能称为“高性能混凝土”。混凝土的性能（performance）更强调过程行为与最终表现。他们强调高性能混凝土应注重高匀质性，而对混凝土匀质性的研究和控制在我国混凝土生产中极其缺乏。我国结构混凝土的均质性是较差的，而且不被重视。

在高性能混凝土发展的早期，国外一般都认为高性能混凝土必须具有高强。吴中伟院士根据我国混凝土发展的实际情况，创新性地提出高性能混凝土应该加强中等强度等级混凝土高性能化的研究，这样才能使高性能混凝土的发展具有广泛的现实意义。中国建筑材料科学研究总院姚燕教授提出“寿命优先，强度适

宜”的中等强度混凝土高性能化的配合比设计思路，并组织进行大量实验研究和工程推广工作，为高性能混凝土商品化、拓展应用领域和提高质量提供了技术支撑。法国科学家也提出凡要求长期耐久性的一切工程必须采用高性能混凝土，即使从结构角度上不要求用高强度的混凝土。应该说，这些观点强调混凝土的耐久性和匀质性是高性能的首要条件，在此思想指导下开展的中等强度等级混凝土的研究扩大了高性能混凝土的应用范围，对提高中国混凝土整体质量具有深远的意义。高强混凝土用强度的单一指标就可以与普通混凝土加以区分。根据我国混凝土技术水平的现状，我国土木工程学会高强与高性能混凝土委员会定义，强度等级等于或高于 C50 的混凝土为高强混凝土。因此，高性能混凝土既可以是中等强度等级的，也可以是高强度等级的混凝土。

高性能混凝土有时亦被称为“绿色混凝土”^[2]。绿色混凝土要求具有环境友好性，包括材料组成、生产过程、产品性能，绿色混凝土同样是一个理念，而不是一种特殊的混凝土。绿色混凝土与高性能混凝土互有关联，但侧重点有所不同。

高性能混凝土的出现，给土木工程界最直接的冲击是对混凝土耐久性的重视有所加强了，粉煤灰、矿渣等掺合料的使用增多了，预拌混凝土更普遍了。由于高性能混凝土一般具有高胶凝材料用量、低水胶比与掺入大量活性掺合料等配制特点，致使高性能混凝土的硬化特点与内部结构，同传统的普通混凝土相比具有很大的差异。高强高性能混凝土的众多优良性能来自致密的细观结构和低水胶比，这同时也带来了混凝土的脆性和易于开裂的倾向。Wittmann 也认为高性能混凝土存在三个问题，脆性、自收缩和耐久性。高性能混凝土在国内外的应用实践表明，早期开裂问题已成为制约其在工程中应用的重要因素。因此，改善高性能混凝土的抗裂性是高性能混凝土研究中急需解决的问题。

1.1.2 高性能混凝土在我国的研究和应用情况

1824 年，英国工程师亚斯普丁获得了水泥发明专利。19 世纪 30 年代，英国在修建泰晤士河隧道工程中首次大规模使用了水泥混凝土，标志着真正意义上的混凝土在建筑工程应用上的开始。经过 180 年的发展，混凝土已经成为种类繁多、用途最广、用量最大的建筑材料，并经历着多次重大的技术进步。我国混凝土技术也在快速发展，特别是近 20 年来，在国际高性能混凝土技术的带动下，在大量基础设施建设的推动下，我国混凝土生产和制备技术也取得了不少突破性进展，满足了不断增高的建筑施工技术的要求。

1.1.2.1 高性能混凝土的研究

20 世纪 80 年代，我国混凝土技术相对落后，矿物掺合料基本不用、化学外加剂很少使用、泵送施工刚刚开始、混凝土的强度等级和耐久性不高，当时的研

究重点是如何提高混凝土的各项性能指标。当时国际高性能混凝土采用的技术路线给当时的混凝土配制技术提供了思路。

中国对高性能混凝土的研究起步基本与国际同步。自 20 世纪 90 年代初期国家自然科学基金会、建设部、铁道部和国家建材局联合资助了重点科研项目“高强与高性能混凝土材料的结构力学性态研究”开始,1996 年我国“九五”重点科技攻关项目“重点工程混凝土安全性研究”是混凝土领域的第一个国家攻关项目,中国建筑材料科学研究总院组织国内相关科研院所、大专院校,开展跨部门、跨行业的联合攻关,项目围绕高性能混凝土技术进行全面研究,解决了确保混凝土材料安全性的一系列关键科学技术问题。在高性能混凝土原材料质量和性能控制技术、混凝土抗冻性设计及其控制技术、钢筋混凝土阴极保护技术、混凝土耐化学腐蚀性控制技术、高性能混凝土的制备和施工技术方面取得了突破,该项目成果获 2004 年国家科技进步二等奖。

随后,国家“十五”科技攻关项目“新型高性能混凝土及其耐久性的研究”(2001.1~2003.12)、国家 973 项目“高性能水泥制备和应用的基础研究”(2002.4~2006.9)、国家自然科学基金重点项目“混凝土结构裂缝的形成与发展机理及控制技术研究”(2005.1~2008.12)、国家“十一五”科技支撑项目“高性能道路水泥混凝土路面关键技术”(2006.11~2009.12)、国家 973 项目“水泥低能耗制备与高效应用的基础研究”(2008.8~2013.8)等多个科研项目相继立项和组织实施。

纵观“九五”、“十五”、“十一五”的十余年里,先后有几百人参加了上述三个攻关项目的研究工作,为混凝土耐久性的提高进行着艰辛的探索。通过高性能混凝土技术的系统研究,为我国重点工程提供了一批新理论、新技术、新成果,利用研究成果制定了多个标准、规范、方法、技术条件。在这些国家大型科研项目的支持下,我国在高性能混凝土新材料研发、耐久性控制、设计和施工技术等方面取得突破:开发了多品种的工业废渣掺合料,通过物理活化和化学活化解决早期活性、抗裂、收缩等问题,并大量应用;从控制各种原材料的氯离子和含碱量入手控制混凝土的碱—集料反应和钢筋锈蚀反应,全国很多地区和大型工程都建立了碱集料反应分布图和安全集料矿山。围绕提高混凝土耐久性能、延长混凝土工程寿命开展了大量系统的研究和工程示范应用,取得了大量科研成果,整体推进了中国混凝土耐久性研究和高性能混凝土工程应用的进程。

我国高性能混凝土的工程应用起始于科研项目的示范工程,国家重大项目的研究工作一方面是瞄准学科前沿,通过发表大量论文、论著,制定相关标准、规范、方法、技术条件,建设生产线(或基地),实现新材料新技术产业化等途径带动全国混凝土材料的研究和应用;另一方面瞄准国家重大需求,重点解决与我国国民经济发展和基础设施建设直接相关的共性关键技术,将研究形成的一系列

高性能混凝土实用新技术成果与工程建设紧密结合，有力地支持了我国的经济建设。

我国现阶段正处于土木工程建设的快速发展时期，大批国家基础设施正在建设之中，大坝、铁路、公路、核电站等建设量巨大，这些基础设施将成为支撑我国国民经济持续发展的重要支点，其耐久性至关重要，正确进行耐久性试验、检验和评定是实现其耐久性的根本保证。20 年来，中国建筑材料科学研究总院把研究工作中取得的高性能混凝土技术已推广应用到三峡工程、青藏铁路、南水北调、田湾核电站、首都机场新航站楼、山东龙固煤矿、京沪高速铁路等多个国家重点工程中，为我国重点工程提供了优质产品和新技术，取得显著成绩。举两个实例加以说明。

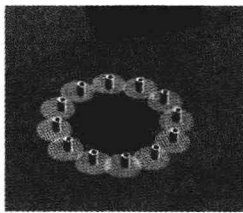
(1) 高早强抗裂高性能混凝土技术不断延伸特殊凿井的深度

冻结法凿井是我国穿过深厚冲积层凿井最主要的特殊施工方法（图 1-1）。20 世纪，冻结立井井筒穿过的冲积层最大厚度为 374.5m，冻结最大深度为 435m。进入 21 世纪以来，我国煤炭基本建设迎来了一个新高潮，立井穿过的冲积层厚度和冻结深度达到了一个新的增长点。由于地压、冻结压力和水压的增大，要求加大井壁厚度和混凝土强度等级，造成施工速度慢，建井费用高，井壁压坏、开裂和透水的机率增多，常规的双层现浇钢筋混凝土井壁已无法达到深冻结井的需要。



1.冻结:

采用人工制冷，将井筒周围的地层冻结形成封闭的圆筒——冻结壁，以隔绝地下水，抵抗地压。



2.开挖:

在冻结壁的保护下进行掘砌工作。



3.混凝土井壁施工:

外层井壁自上而下施工，内层井壁自下而上连续施工

图 1-1 煤炭冻结深井的施工

中国建材总院与煤炭科学研究总院建井分院合作利用高性能混凝土技术把混凝土强度等级由 C50 逐步提高至 C60、C70、C80、C90，能较全面地适应深厚冲积层冻结段内、外层井壁筑壁的需要，解决了大于 500m 冲积层深冻结井筑壁技术难题^[3]。根据矿井的特点，研发了专用的早强减水剂和防裂密实剂，采用多种液体高效减水剂与粉煤灰、磨细矿渣等矿物外掺料优化组合的双掺技术，分别配制了冻结段外层井壁 C40~C90 低水化热早强密实高性能混凝土和 C40~C90 低

水化热防裂密实高性能混凝土。与当前国内外同类研究、同类技术对比，研制的抗裂高性能混凝土具有强度高；工作性能好，便于施工；密实性好，耐腐蚀性好；费用低，每立方米节省材料费 30%左右等特点。

该高性能混凝土技术在近 20 个国家重点煤矿矿井建设中成功应用了近 30 万方混凝土（表 1-1），解决了深井建设控制混凝土早期开裂和提高服役环境下耐久性能的难题，支持我国煤矿井筒不断突破新的深度，采掘更深的煤层，通过节约材料降低直接成本、提高混凝土强度等级减薄井壁厚度、减少投资、节省工期、减少贷款利息等，节约费用数亿元以上，技术经济效益和社会效益十分显著。

部分使用高性能混凝土技术施工冻结井的煤矿 表 1-1

序 号	煤 矿 名 称	冻结深度 (m)
1	河南焦煤集团程村煤矿	485
2	河南焦煤集团赵固一矿	575
3	河南焦煤集团赵固二矿	628
4	河南焦煤集团方庄煤矿	447
5	河南焦煤集团新河煤矿	290
6	河南焦煤集团九里山煤矿	268
7	河南焦煤集团张屯煤矿	263
8	河南平顶山泉店煤矿	500
9	陕西胡家河煤矿	578
10	陕西孟村煤矿	603
11	宁夏红一煤矿	450
12	河南驻马店吴桂桥煤矿	440
13	山西同煤浙能麻家梁煤矿	386

(2) 用超早强高性能混凝土技术制作高速铁路无砟轨道板

高速铁路是我国中长期规划和拉动内需项目的重点建设工程。无砟轨道技术是高速铁路的关键。无砟轨道具有平顺性高、刚度均匀性好、轨道几何形位能持久保持、维修工作量显著减少等特点，列车在上面行驶速度更快，更平稳。京津客运专线引进采用德国博格公司无砟轨道技术，该技术中的轨道板（以下称博格板）为工厂预制，其质量容易控制，现场混凝土施工量少，施工进度较快，道床外表美观。但是德国技术采用超细水泥方案配制混凝土，以保证在水灰比为 0.4