

HUNNINGTU TIJI
WENDINGXING HE KANGLIEXING LILUN YU JISHU

混凝土体积

稳定性和抗裂性理论与技术

钱春香 何智海◎著



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

混凝土体积稳定性和 抗裂性理论与技术

钱春香 何智海 著



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

• 南京 •

内 容 简 介

本书在国家自然科学基金重点项目、教育部新世纪优秀人才项目、江苏省“333 工程”项目、江苏省交通科技计划项目、铁道部和上海铁路局科技开发项目以及十余项重点工程科技攻关项目的资助下,对水泥混凝土的体积稳定性和抗裂性的核心理论及应用技术开展了大量研究,并在工程建设中得到了成功应用。全书共 11 章,内容主要包括混凝土原材料、功能组分、配合比、环境温湿度等对体积稳定性和抗裂性的影响规律及机理,体积变形和开裂风险的定量预测方法,抗裂混凝土的设计方法和裂缝修复技术,以及相应技术在典型工程中的成功应用。

本书可供土木建筑、工程材料、桥梁市政、隧道机场、道路与铁道工程等专业的科研人员与工程技术人员从事科研、工程设计、检测、维护与管理时参考,也可供大专院校的教师、研究生及高年级本科生阅读使用。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土体积稳定性和抗裂性理论与技术/钱春香,何智海著. —南京:东南大学出版社, 2015. 11

ISBN 978-7-5641-6169-9

I. ①混… II. ①钱…②何… III. ①混凝土—土
体积变化—稳定性—研究②混凝土—抗裂性—研究
IV. ①TU528.0

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 276611 号

出版发行 东南大学出版社
社 址 南京市四牌楼 2 号 邮编:210096
出 版 人 江建中
网 址 <http://www.seupress.com>
电子邮箱 press@seupress.com
经 销 全国各地新华书店
印 刷 江苏凤凰数码印务有限公司
版 次 2015 年 12 月第 1 版
印 次 2015 年 12 月第 1 次印刷
开 本 787 mm×1092 mm 1/16
印 张 35.5
字 数 860 千
书 号 ISBN 978-7-5641-6169-9
定 价 99.00 元

本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系。电话(传真):025-83791830

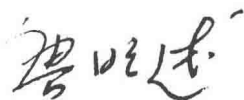
序 言

混凝土是目前世界上使用最为广泛的土木工程结构材料。科技工作者从不断发生的混凝土结构耐久性失效中意识到,造成混凝土结构耐久性和使用寿命不足的因素有很多,而其中广泛存在的裂缝是重要因素之一,因此必须深化混凝土结构材料体积稳定与裂缝防治的基础理论与应用技术研究。

本书通过材料科学与力学、化学等多学科交叉,从体积稳定性机理出发,建立了湿热耦合体积变形(包括高温爆裂)和碱—集料反应膨胀的预测方法;总结了化学外加剂对体积稳定性的影响规律和矿物掺合料影响干缩徐变的定量预测方法;分析了混凝土组分对热变形的影响及相变材料调控技术;比较了聚丙烯纤维、聚乙烯醇纤维、钢纤维对不同龄期混凝土抗拉强度和抗裂性的影响;分析了变形和裂缝对混凝土传输性能和耐久性的影响及缺陷修复方法;实现了通过微细观结构行为去解读复杂宏观现象的理念;总结了隧道、桥梁、机场、高铁、地铁等重点工程混凝土体积稳定性调控和裂缝防治的实践经验。因此,本书具有重要的理论和现实意义。

东南大学材料科学与工程学院长期从事混凝土变形控制与裂缝防治理论和应用技术研究。编写组成员在东南大学特聘教授、东南大学绿色建材研究所所长钱春香教授的带领下,对国家自然科学基金重点项目、教育部新世纪优秀人才项目、江苏省“333工程”项目、江苏省交通科技计划项目及十余项重点工程科技攻关项目的研究成果进行了总结与凝练,并获得2013年度国家科技进步二等奖,这本著作正是该团队众多科研人员智慧的结晶。

本书内容丰富、体系完整,不仅是最新科研成果的展示,更是一本可供高校师生、科技人员及工程技术人员参考的高水平专业读物。我很高兴看到此书的出版,特为之序。



中国工程院院士

2014年11月

前 言

水泥混凝土具有悠久的使用历史,目前仍然是世界上使用量最大、使用面最广的建筑材料。混凝土在施工和使用过程中,由于其自身微结构特点和服役环境等的影响,易产生体积变形甚至开裂,从而导致混凝土耐久性降低、工程结构使用寿命缩短。为有效防治水泥混凝土由于体积稳定性和抗裂性引起的工程质量问题,就必须正确认识混凝土原材料、功能组分、配合比、环境温湿度等对体积稳定性和抗裂性的影响规律及机理,研究体积变形和开裂风险的定量预测方法、抗裂混凝土的设计方法以及裂缝修复技术。为此,本研究团队十多年来开展了水泥混凝土体积稳定性和抗裂性的系统研究,并结合隧道、桥梁、机场、高铁、地铁等国家重点工程建设开展了应用研究,这些为水泥混凝土体积稳定性和抗裂性设计提供了科学依据和工程经验,对基础设施建设有着十分重要的理论和现实意义。

笔者及团队成员在国家自然科学基金重点项目、教育部新世纪优秀人才项目、江苏省“333工程”项目、江苏省交通科技计划项目、铁道部和上海铁路局科技开发项目以及十余项重点工程科技攻关项目的资助下,对水泥混凝土的体积稳定性和抗裂性的核心理论及应用技术开展了大量研究,并在工程建设中得到了成功应用,本书是对作者十多年来研究工作的总结。

全书共 11 章。

第 1 章:介绍了水泥混凝土的使用历史和现状,提出了混凝土技术发展面临的机遇和挑战,阐述了混凝土可持续发展与体积稳定性、抗裂性和耐久性的关系。

第 2 章:基于混凝土多孔介质特性,开展了混凝土内部湿热传输机理分析,建立了混凝土湿热耦合传输数值模型和湿热耦合体积稳定性计算方法,开发了湿热耦合变形数值模拟计算软件,并对此进行了实例验证和数值实验。

第 3 章:研究了不同减水剂及功能组分对混凝土塑性收缩、干燥收缩、自收缩和徐变的影响,分析了减水剂对混凝土组成、结构和内部水分传输的影响及其与收缩徐变的关系,并阐述了减缩剂对混凝土收缩徐变的影响机理。

第 4 章:对比研究了钢纤维混凝土的静态力学性能、混杂纤维混凝土的断裂力学性能、PVA 纤维的力学性能,继而开展 PP 纤维混凝土的抗塑性开裂性能和纤维混凝土的体积稳定性研究,得出了纤维对混凝土体积稳定性和抗裂性的影响规律和机理。

第 5 章:基于多尺度理论和灰色系统理论得出了低收缩徐变水泥石的微观结构特征,研

究了低收缩徐变胶凝材料的强度设计方法和等强度下低收缩徐变胶凝材料设计方法,并研制出超低收缩徐变混凝土,揭示了相关机理。

第6章:研究了混凝土基体相的热变形性能,对比分析了常规组成对热变形调控的效果范围,继而开展了封装埋相变材料和相变导热流体的研制及其对水泥基材料内部温升的影响研究,最后提出了有效的混凝土内部温升控制技术。

第7章:介绍了高温爆裂的现象、定量表征方法与危害,分析得出水泥基材料高温爆裂的条件,运用蒸汽压理论和湿热耦合传输的气压场计算分析了混凝土爆裂,据此提出了预防混凝土爆裂的方法。

第8章:介绍了碱集料反应研究历史,提出了有效碱新概念,阐述了活性集料中的碱及其时空演化规律,对碱集料反应膨胀展开了定量计算分析,提出了碱集料反应的防治措施。

第9章:分析了混凝土体积稳定性与传输性能和耐久性的关系,研究了应力对气体传输和碳化的影响,阐述了裂缝和缺陷修复方式与水传输的关系,同时介绍了几种修复新材料。

第10章:介绍了上述研究成果在南京长江隧道工程、南京玄武湖隧道、南京九华山隧道工程、苏州独墅湖隧道、无锡蠡湖隧道和南京地铁一号线工程等地下工程中的应用,为类似工程建设提供参考。

第11章:介绍了上述研究成果在苏通大桥辅桥航道桥、沪杭高铁特大桥、安庆长江公路大桥和南京禄口国际机场二期工程等交通枢纽工程中的应用,为类似工程建设提供参考。

本书编写分工如下:第1章——钱春香;第2章——陈德鹏、刘玉峻、巴明芳;第3章——陆旺杰、张异和赵飞;第4章——钱春香、高祥彪和耿飞;第5章——何智海;第6章——高桂波、朱晨峰、丁士卫;第7章——王珩、游有鲲和李敏;第8章——钱春香、庄园、徐文、陈春和张亚梅;第9章——王育江、巴明芳、吴森、杨建明、赵洪凯和王瑞兴;第10章——钱春香、王辉、巴明芳、王育江、黄雷、李迎春、陈德鹏;第11章——钱春香、王辉、何智海、胡迎波和王瑞兴。全书由东南大学钱春香、绍兴文理学院何智海负责审阅、统稿,并对各章节做了部分整理和修改。参编人员均为本人指导的博士或硕士研究生,编写的内容均为其在东南大学攻读学位期间所开展的工作。

感谢国家自然科学基金委员会、各重点工程建设单位及省部科技和人才计划对本书研究工作的资助,特别感谢唐明述院士对笔者研究工作的长期指导和关心,并为本书作序鼓励。

由于混凝土材料体积稳定性和抗裂性所涉及的问题较为复杂,影响因素众多,尚有许多问题有待进一步研究,加之本书笔者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请读者不吝赐教。

东南大学 钱春香

2014年11月

目 录

1 绪论	1
1.1 水泥混凝土的使用历史和现状	1
1.2 发展面临的挑战	2
1.3 可持续发展与体积稳定性、抗裂性和耐久性	4
1.4 本书主要内容	6
参考文献	6
2 常温湿热耦合体积稳定性机理与变形预测	8
2.1 混凝土的多孔介质特性与湿热耦合变形机理	8
2.1.1 混凝土的多孔介质特性	8
2.1.2 混凝土湿热耦合变形机理	10
2.2 混凝土内部湿热传输机理	13
2.2.1 混凝土多孔介质的湿传输机理	13
2.2.2 混凝土中的热传输机理	14
2.3 混凝土湿热耦合传输数值模型	15
2.3.1 混凝土内部湿传输基本模型	15
2.3.2 水泥石内部热传输基本模型	18
2.3.3 混凝土湿热耦合传输模型	19
2.4 混凝土湿热耦合体积稳定性计算方法	27
2.4.1 湿热耦合体积稳定性计算的方法体系	27
2.4.2 温、湿度分布的解析法求解	27
2.4.3 湿度分布的应力转化法	35
2.4.4 湿热耦合变形的有限元分析方法	37
2.5 混凝土湿热耦合变形数值模拟计算的软件开发	38
2.5.1 基于 Visual Basic 调用 Matlab 及 ANSYS 的软件开发策略	38
2.5.2 CTMSoft 软件开发关键问题及其实现	40
2.5.3 软件操作界面及使用简介	43
2.6 混凝土湿热耦合变形数值模拟方法的实例验证	45
2.6.1 数值模拟分析建模	45
2.6.2 边界条件选择确定	45

2.6.3	基本参数的确定	48
2.6.4	利用 CTMSoft 对混凝土变形进行数值模拟	49
2.6.5	数值模拟结果及其比较分析	50
2.7	材料和结构参数对体积稳定性影响的数值分析	55
2.7.1	材料参数对混凝土变形影响的模拟实验分析	55
2.7.2	结构参数对混凝土变形影响的初步分析	57
	参考文献	58
3	化学外加剂对塑性收缩、干缩和徐变的作用及机理	64
3.1	概述	64
3.2	高效减水剂及功能组分对混凝土塑性收缩和抗裂性的影响	64
3.2.1	不同高效减水剂及功能组分对混凝土塑性抗裂的影响	65
3.2.2	塑性收缩变形	68
3.3	不同减水剂对混凝土干缩、自收缩、徐变的影响规律	74
3.3.1	外加剂对混凝土干燥收缩和自收缩的影响规律	79
3.3.2	外加剂对混凝土干燥徐变和基本徐变的影响规律	83
3.4	减水剂对混凝土中水分传输的影响及其与收缩徐变的关系	89
3.4.1	混凝土内部相对湿度的经时变化	89
3.4.2	不同减水剂对砂浆失水率的影响	97
3.4.3	不同减水剂对混凝土湿含量的影响	97
3.5	减水剂对混凝土组成和结构的影响及其与收缩徐变的关系	98
3.5.1	不同外加剂对非蒸发水含量的影响	99
3.5.2	不同外加剂对水泥浆体固相成分的影响	102
3.5.3	不同外加剂对混凝土孔溶液的影响	108
3.5.4	不同外加剂对混凝土和砂浆孔结构的影响	110
3.5.5	低收缩低徐变混凝土减水剂分子结构	112
3.6	减缩剂对收缩徐变的作用及机理	113
3.6.1	对塑性开裂的影响	113
3.6.2	减缩剂对干燥收缩的影响	114
3.6.3	减缩剂对徐变的影响	116
3.6.4	作用机理分析	117
	参考文献	118
4	纤维的作用及机理	121
4.1	钢纤维混凝土的静态力学性能	121
4.1.1	钢纤维混凝土轴心抗拉性能	121
4.1.2	钢纤维混凝土轴心抗压性能	127
4.1.3	钢纤维钢筋混凝土梁抗弯性能	131

4.2 混杂纤维混凝土的断裂力学性能	137
4.2.1 混杂纤维混凝土基本性能	138
4.2.2 混杂纤维混凝土断裂力学性能研究	142
4.2.3 混杂纤维混凝土的声发射特性	150
4.3 PVA 纤维的力学性能	151
4.3.1 PVA 纤维对混凝土抗压强度的影响	151
4.3.2 纤维对混凝土抗折强度的影响	152
4.3.3 纤维对混凝土静弹性模量的影响	153
4.3.4 纤维对混凝土抗拉强度和极限延伸率的影响	153
4.3.5 PVA 纤维影响混凝土力学性能的机理	154
4.4 PP 纤维混凝土的抗塑性开裂性能	155
4.4.1 塑性抗裂性能的试验方法	155
4.4.2 塑性抗裂性能的评价方法	158
4.4.3 PP 纤维混凝土的抗塑性开裂性能	162
4.4.4 PP 纤维改善抗塑性开裂性能的机理	167
4.5 纤维混凝土的体积稳定性	172
4.5.1 钢纤维和 PP 纤维混凝土的干缩性能	172
4.5.2 PVA 纤维混凝土的收缩徐变性能	176
4.5.3 钢纤维对 AAR 膨胀的限制作用	180
参考文献	186
 5 矿物掺合料对收缩徐变的影响及机理	188
5.1 概述	188
5.2 低收缩徐变水泥石微观结构特征	189
5.2.1 试验原材料与方法	189
5.2.2 水泥石的纳米表征	197
5.2.3 低收缩徐变水泥石的微观结构模型	211
5.3 基于低收缩徐变的胶凝材料强度设计方法	211
5.3.1 灰色系统理论与试验方法	212
5.3.2 胶凝材料强度与影响因素分析	220
5.3.3 基于低收缩徐变的胶凝材料强度设计模型	228
5.4 等强度低收缩徐变胶凝材料设计方法	231
5.4.1 研究方案	231
5.4.2 胶凝材料干燥收缩和徐变与影响因素分析	234
5.4.3 等强度低收缩徐变胶凝材料设计模型	242
5.5 低收缩徐变混凝土的制备与机理分析	247
5.5.1 基于胶凝材料设计的低收缩徐变混凝土	247
5.5.2 低收缩徐变混凝土的力学性能、干燥收缩和徐变度	247

5.5.3 低收缩徐变混凝土的机理分析	252
参考文献	255
6 热变形机理和相变材料调控	260
6.1 概述	260
6.2 混凝土胶凝材料基体相的热变形性能研究	261
6.2.1 固相组分对水泥石热膨胀系数的影响	261
6.2.2 水对水泥石热变形性能的影响	262
6.2.3 孔对水泥石热变形性能的影响	263
6.3 混凝土组成对热变形性能的影响	264
6.3.1 浆体对混凝土热膨胀系数的影响	264
6.3.2 骨料对混凝土热膨胀系数的影响	265
6.3.3 含气量对混凝土热膨胀系数的影响	267
6.4 常规组成对混凝土热变形调控的比较分析及内部温升控制技术的提出	268
6.4.1 混凝土热膨胀系数的可调控幅度分析	268
6.4.2 混凝土导热性能的影响因素与调控效果分析	270
6.5 封装填埋相变材料对水泥基材料内部温升的影响	273
6.5.1 用于降低大体积混凝土水化热温升的相变材料的性能要求	273
6.5.2 采用封装填埋 PCM 降低水泥基材料水化热温升	274
6.6 采用相变导热流体降低混凝土的内部温升	279
6.6.1 相变导热流体的组成	279
6.6.2 相变导热流体的性能	279
6.6.3 相变导热流体的导热机理分析	284
6.6.4 相变导热流体降低混凝土的水化热温升的效果	285
参考文献	299
7 高温爆裂体积稳定性	301
7.1 高温爆裂的现象、定量表征与危害	301
7.2 水泥基材料高温爆裂的条件	302
7.2.1 受火制度与爆裂的关系	303
7.2.2 净浆、砂浆和混凝土的区别	305
7.3 基于蒸汽压理论的混凝土爆裂分析	306
7.3.1 混凝土高温作用下的物理化学变化	307
7.3.2 高温下混凝土内部水的汽化对温度场的影响	308
7.3.3 高温下混凝土内部的湿迁移与气压场的形成	309
7.4 基于湿热耦合传输的气压场计算与爆裂特性分析	311
7.4.1 一维传输下的气压场计算	311
7.4.2 受火制度、材料参数与爆裂特性的进一步分析	315

7.5 预防爆裂的方法	318
7.5.1 外涂防火涂层	318
7.5.2 内掺低熔点有机物	319
7.5.3 机理分析	321
7.5.4 单丝纤维直径和掺量影响爆裂的定量分析	322
7.5.5 预防爆裂措施的其他影响与修复	323
参考文献	327
8 碱集料反应膨胀	329
8.1 碱集料反应的发现与研究	329
8.2 碱	330
8.2.1 水泥中的碱	330
8.2.2 集料中的碱	332
8.2.3 矿物掺合料中的碱	334
8.2.4 化学外加剂的碱	340
8.2.5 环境中的碱	342
8.3 活性集料中的碱及其时空演化	343
8.3.1 混凝土基体中碱的演化与状态	343
8.3.2 有效碱析析	344
8.3.3 孔溶液中碱的测量方法	345
8.3.4 活性集料中反应碱(新有效碱)的测量方法	346
8.3.5 基于菲克定律的活性集料中反应碱计算方法	347
8.3.6 反应性碱的影响因素、定量预测与试验验证	356
8.4 碱集料反应膨胀的计算	359
8.4.1 基于扩散理论和弹性力学的膨胀计算	359
8.4.2 基于固相反应理论和弹塑性力学的膨胀计算	363
8.4.3 计算结果与试验比较	370
8.5 碱集料反应防治措施	373
8.5.1 内掺短纤维	373
8.5.2 外裹连续纤维	374
8.5.3 外部加载	376
8.5.4 添加矿物掺合料	377
参考文献	381
9 变形和裂缝对传输性能和耐久性的影响与缺陷修复	386
9.1 体积稳定性与传输性能和耐久性的关系	386
9.2 应力和裂缝对水传输的影响	386
9.2.1 水在混凝土中的非达西渗流	386

9.2.2	水在混凝土裂缝中的渗流方程	393
9.2.3	拉应力作用下混凝土的抗渗透性	402
9.3	应力对气体传输和碳化的影响	405
9.3.1	拉应力对空气渗透系数的影响	405
9.3.2	拉应力对混凝土材料碳化的影响	407
9.3.3	拉应力对混凝土构件碳化的影响	409
9.4	裂缝和缺陷修复方式与水的传输	411
9.4.1	外贴定形材料	411
9.4.2	外涂涂层	412
9.4.3	渗透性材料	413
9.4.4	三种方法的比较	414
9.5	其他几种修复材料介绍	415
9.5.1	连续纤维增强热塑性树脂基复合材料	415
9.5.2	磷酸钾镁水泥	423
9.5.3	微生物水泥	432
	参考文献	442
10	地下工程应用	443
10.1	南京长江隧道工程	443
10.1.1	工程简介	443
10.1.2	隧道混凝土服役条件与关键技术问题	443
10.1.3	体积稳定性和抗裂性设计	446
10.1.4	抗中性化设计	455
10.1.5	防水耐久性设计	463
10.1.6	管片混凝土微观结构演化	466
10.2	南京玄武湖隧道	476
10.2.1	工程概况	476
10.2.2	混凝土关键技术问题及解决方案	477
10.2.3	实际效果	477
10.3	南京九华山隧道工程	478
10.3.1	工程简介	478
10.3.2	混凝土关键技术问题及解决方案	478
10.4	苏州独墅湖隧道和无锡蠡湖隧道	479
10.4.1	工程简介	479
10.4.2	混凝土关键问题	480
10.4.3	基于现场混凝土质量的抗碳化耐久性评估	480
10.5	南京地铁一号线工程	485
	参考文献	485

11 交通枢纽工程应用	486
11.1 苏通大桥辅桥航道桥	486
11.1.1 工程简介	486
11.1.2 混凝土关键技术问题	487
11.1.3 高强混凝土收缩的尺寸效应及预测模式的修正方法	487
11.1.4 基于混凝土短期试验结果修正的徐变预测模型	492
11.2 沪杭高铁特大桥	499
11.2.1 工程简介	499
11.2.2 跨沪杭高速公路特大桥	499
11.2.3 现场收缩徐变监测	499
11.2.4 现场收缩徐变监测	502
11.2.5 收缩徐变对混凝土结构挠度分析	507
11.2.6 上海横潦泾特大桥	513
11.2.7 上海松江特大桥	518
11.3 安庆长江公路大桥	520
11.3.1 工程简介	520
11.3.2 混凝土关键技术问题与实践经验	520
11.3.3 索塔清水混凝土外观质量评价方法	522
11.3.4 混凝土外观图像的获取要求	525
11.3.5 混凝土外观质量的评价	525
11.3.6 混凝土外观质量评价应用举例	531
11.3.7 安庆长江公路大桥索塔清水混凝土研究与应用经验	533
11.4 南京禄口国际机场二期工程	535
11.4.1 工程简介	535
11.4.2 抗裂性设计	536
11.4.3 抗碳化性能设计	541
11.4.4 现场结构混凝土评估	543
11.4.5 抗碳化与超声波速关系	545
11.4.6 现场混凝土钢筋保护层厚度跟踪	546
11.4.7 混凝土碳化寿命预测	547
参考文献	551

1 绪论

1.1 水泥混凝土的使用历史和现状

混凝土的使用具有悠久的历史。大约在公元前 6500 年,由叙利亚人开始,并传播到埃及和古希腊。随后罗马人对其进行了改进,甚至英文 Concrete 一词源于拉丁文 Concretus,意思是“长在一起”。后来随着罗马文明的衰落,罗马混凝土技术失传了将近 1500 年之久,直到 19 世纪又被重新发现,特别是法国人 Joseph-Louis Lambot 发明的钢丝网水泥,标志着钢筋混凝土时代的到来。毋庸置疑,混凝土发展到今天已经成为世界上最重要的材料之一,构建了大量的建筑、铁路、公路、桥梁、大坝等基础设施,甚至还包括一些艺术品,其用量已仅次于水。如表 1.1 所列^[1],2013 年世界水泥总产量高达 40 亿 t,其中中国 23 亿 t,已超过全球总量的 50%。折合成混凝土,相当于全球年人均消耗约 2 m³,而中国年人均消耗高达 5 m³ 以上。

表 1.1 2013 年世界水泥产量及产能^[1] (千吨)

国家力	水泥产量		熟料产能 ^e	
	2012	2013 ^e	2012	2013
美国(包括波多黎各)	74 900	77 800	106 000	105 000
巴西	68 800	70 000	57 000	60 000
中国	2 210 000	2 300 000	1 800 000	1 900 000
埃及	46 100	46 000	46 000	46 000
德国	32 400	34 000	31 000	31 000
印度	270 000	280 000	270 000	280 000
印尼	32 000	35 000	47 500	50 000
伊朗	70 000	75 000	75 000	80 000
意大利	33 000	29 000	46 000	46 000
日本	51 300	53 000	55 000	55 000
朝鲜	48 000	49 000	50 000	50 000
墨西哥	35 400	36 000	42 000	42 000
巴基斯坦	32 000	32 000	42 500	42 000
俄罗斯	61 500	65 000	80 000	80 000
沙特阿拉伯	50 000	50 000	55 000	55 000
泰国	37 000	35 000	50 000	50 000
土耳其	63 900	70 000	66 900	67 000
越南	60 000	65 000	68 000	70 000
其他国家	524 000	597 000	312 000	291 000
世界总量	3 800 000	4 000 000	3 300 000	3 400 000

注:^e 估计。

水泥混凝土工业是各国经济发展的基石。就以 2013 年为例,按每吨水泥 300 元估算,

我国水泥销售额达 6 900 亿元,而我国国内生产总值 GDP 为 568 845 亿元^[2],我国水泥销售额占国内生产总值 GDP 的 1.21%。混凝土按 70 亿 m³、300 元/m³ 估算,全年混凝土销售额达 21 000 亿元,占我国国内生产总值 GDP 的 3.69%。在美国,2005 年美国大约有 114 个水泥厂、6 650 家预拌混凝土工厂,混凝土工业直接雇员数 220 000 人;在英国,混凝土工业直接雇员数 40 000 人,混凝土施工行业雇员数大约占英国人口的 7%,混凝土施工行业产值占 GDP 的 10%^[3]。

1.2 发展面临的挑战

(1) 环境和气候恶化

如此巨大量混凝土的生产和使用,是全球环境和气候恶化的主要因素之一。主要表现在 CO₂ 排放、能源消耗、粉尘排放、石灰石和集料矿物资源和淡水资源消耗等。每年生产和使用 34 亿 t 水泥熟料,意味着每年约排放温室气体 34 亿 t,约占所有工业和人类活动年排放 CO₂ 总量的 5%~10%,仅次于汽车工业的排放而位居第二。如表 1.2 所示,在美国,整个工业排放温室气体中,1990 年水泥工业占 17.6%,2005 年和 2012 年分别为 27.5%和 24.3%。

表 1.2 美国工业排放量(CO₂当量)^[4]

例子/来源	1990	2005	2008	2009	2010	2011	2012
二氧化碳(CO ₂)	188.6	166.7	161.0	119.7	142.3	147.4	144.6
钢铁冶炼生产和焦炭生产	99.8	66.7	66.8	43.0	55.8	60.0	54.3
钢铁生产	97.3	64.6	64.5	42.1	53.7	58.6	53.8
冶金焦炭生产	2.5	2.0	2.3	1.0	2.1	1.4	0.5
水泥生产	33.3	45.9	41.2	29.4	31.3	32.0	35.1
石灰生产	11.4	14.0	14.0	10.9	12.8	13.5	13.3
氨生产	13.0	9.2	8.4	8.5	9.2	9.4	9.4
碳酸盐的其他进程使用	4.9	6.3	5.9	7.6	9.6	9.3	8.0
其他非农业用途的尿素消耗	3.8	3.7	4.1	3.4	4.7	4.0	5.2
石化生产	3.4	4.3	3.6	2.8	3.5	3.5	3.5
铝生产	6.8	4.1	4.5	3.0	2.7	3.3	3.4
碳酸钠生产和消耗	2.7	2.9	2.9	2.5	2.6	2.6	2.7
二氧化碳消耗	1.4	1.3	1.8	1.8	2.3	1.8	1.8
二氧化钛生产	1.2	1.8	1.8	1.6	1.8	1.7	1.7
铁合金生产	2.2	1.4	1.6	1.5	1.7	1.7	1.7
锌生产	0.6	1.0	1.2	0.9	1.2	1.3	1.4
玻璃生产	1.5	1.9	1.5	1.0	1.5	1.3	1.2
磷酸生产	1.6	1.4	1.2	1.0	1.1	1.2	1.1
铅生产	0.5	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
碳化硅生产和消耗	0.4	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2
甲烷(CH ₄)	3.3	3.9	3.6	3.3	3.6	3.7	3.7
石化生产	2.3	3.1	2.9	2.9	3.1	3.1	3.1
钢铁生产和冶金焦炭	1.0	0.7	0.6	0.4	0.5	0.6	0.6
钢铁生产	1.0	0.7	0.6	0.4	0.5	0.6	0.6
冶金焦炭生产	+	+	+	+	+	+	+
铁合金生产	+	+	+	+	+	+	+
碳化硅生产和消耗	+	+	+	+	+	+	+

续表 1.2

例子/来源	1990	2005	2008	2009	2010	2011	2012
一氧化二氮(N ₂ O)	34.0	24.4	19.4	16.8	21.1	26.5	21.0
硝酸生产	18.2	16.9	16.9	14.0	16.7	15.8	15.3
乙酸生产	15.8	7.4	2.6	2.8	4.4	10.6	5.8
氢氟烃(HFCs)	36.9	119.8	136.0	135.1	144.0	148.6	151.2
替代消耗臭氧层物质 ²	0.3	103.8	122.2	129.6	137.5	141.5	146.8
二氟-氯甲烷	36.4	15.8	13.6	5.4	6.4	6.9	4.3
半导体制造	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2
全氟碳化物(PFCs)	20.6	5.6	5.1	3.3	3.8	6.0	5.4
半导体制造	2.2	2.6	2.4	1.7	2.2	3.0	2.9
铝生产	18.4	3.0	2.7	1.6	1.6	2.9	2.5
六氟化硫(SF ₆)	32.6	14.7	10.7	9.6	9.8	10.8	8.4
电力传输和分配	26.7	11.0	8.4	7.5	7.2	7.2	6.0
镁生产和加工	5.4	2.9	1.9	1.7	2.2	2.9	1.7
半导体生产	0.5	0.7	0.5	0.3	0.4	0.7	0.7
总计	316.1	334.9	335.9	287.8	324.6	324.9	334.4

注：“+”不超过 0.05 Tg 二氧化碳当量；

²少量的全氟碳化物排放也来源于此。

而环境和气候变化的结果已经在全球范围造成了巨大影响。政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change,简称 IPCC)在 2007 年的 AR4 Assessment Report^[5]中指出,1995—2006 年是自从 1850 年以来有仪器测量记录的地球表面温度最高的 12 年。刚刚发布的 AR5 是继 2007 年 AR4 发布以来最为系统的全球气候评估报告^[5]。AR5 指出,气候系统变暖从 1950 年以来的几十年里变得很明显。大气和海洋已经变暖,冰雪减少,海平面上升。例如,在北半球,1983—2012 年是过去 1 400 年中最暖和的 30 年。海洋变暖意味着气候系统中所储存的能量的增加,而海洋中 90%以上的能量是在 1971—2010 年间积聚的。1901—2010 间,全球海平面平均上升 0.19 m。

近几年来,这些变化也直接导致全球各种极端灾害层出不穷,而各种“百年一遇”、“五十年一遇”等对灾害的描述性词汇也在各种媒体上屡见不鲜,由此引发的极端炎热、干旱、热带风暴、暴风雨雪等自然灾害也愈发频繁和严重。就以 2012 年为例,①炎热、干旱:美国中西部地区遭遇 50 年来最严重的干旱,本土 48 个州有三分之二的区域遭遇了中度以上干旱灾害,创下历史最高纪录,其中 8.6%的土壤处于极端或罕见干旱状态,造成玉米和大豆等农作物减产,经济损失数十亿美元。②台风、热带风暴、飓风:10 月底、11 月初,被称为美国史上最强烈风的“桑迪”登陆美国新泽西州并横扫美国东海岸,造成的经济损失达数百亿美元。纽约地铁、供水、供电等基础设施瘫痪,给人们的生活和生命财产安全带来巨大威胁,而造成这些变化的因素中,首要的就是温室气体。

(2) 资源和能源巨量消耗

用全球生产的水泥配制成混凝土,除了消耗巨量石灰石矿物资源外,每年还将消耗集料矿物约 200 亿 t;每年还消耗淡水资源 16 亿 t,相当于 20 年用掉一个三峡大坝的库容水。在能耗方面,即使在美国,其水泥工业也是所有制造业中最耗能的工业^[6],水泥生产的能耗成本占 20%~30%^[7]。在中国,2013—2014 年水泥生产占整个建材工业能耗的 75%,而建材工业约占全国总能耗的 9%,占全国工业能耗约 15%^[8-9]。

(3) 劳动力日益匮乏

我国混凝土及制品行业从业人数已超过 500 万人^[10]；建筑业从业人数(包括混凝土施工)占全社会从业人数的比重约为 5%，仅次于农林牧业、制造业等^[11]。按 2013 年我国就业人数 76 977 万人计算^[2]，建筑的从业人数约 3 800 万人，其中有一部分与混凝土施工相关。因此，混凝土生产与施工需要的劳动力超过千万。而近几年来，中国劳动力市场呈现出供不应求的局面。以北京为例，2014 年前 6 个月，新增劳动力需求 556 000 人，但只有 218 000 人供应，劳动力缺口达 50% 以上^[12]。

(4) 维修费用大幅攀升

在美国，每隔四年就要对全美主要的基础设施进行一次全面评估，以桥梁为例，在 2013 年的评估报告^[13]中指出：在全美 102 个最大型的城市 and 地区，每天总计有 2 亿次以上交通穿过大量有缺陷的桥梁。大约有九分之一桥梁存在结构缺陷，全美 607 380 座桥梁已平均使用 42 年。美国联邦公路署预计，维修全美这些有缺陷的桥梁总计需要 760 亿美元，每年在桥梁上的建设投资需要在目前 128 亿美元的基础上再增加 80 亿美元用于维修。

1.3 可持续发展与体积稳定性、抗裂性和耐久性

(1) 混凝土仍将是不可替代的最主要的建筑材料

没有一种材料可以完全代替混凝土用作建筑材料，并且为了应对气候恶化引起的极端天气，在全球范围未来需要建设更多用于预防自然灾害的基础设施，对混凝土的需求量将增加。在我国，基础设施建设正不断扩展至海洋与西部地区。据统计^[14]，我国西部地区的矿产资源占全国的 50% 以上；我国大陆海岸线达 18 000 km，面积较大的海岛有 7 000 多个，目前中国石油资源量为 1 070 多亿 t，其中海洋石油资源量为 246 亿 t，占总量的 22.9%；天然气资源量为 54.54 万亿 m³，其中海洋为 15.79 万亿 m³，占 29.0%^[15]。加快海洋与西部地区的基础设施建设，不但有利于我国开拓多元化资源供应渠道、保障国家能源安全，而且对我国民族团结、社会稳定、国家安全与领土完整战略意义重大。2003—2010 年全国铁路投资中有 40.5% 投向西部地区，同期投向西部地区的道路投资占全部道路投资的比重也达到 32.7%^[16]。2014 年上半年，全国铁路完成固定资产投资 3 273 亿元，同比增长 51%，其中，中西部铁路占比达到 80% 以上^[17]。大力发展中西部、海洋及核电工程建设，仍将需要大量混凝土。

水泥混凝土的生产与使用，还可部分消纳其他工业产生的负面环境影响。例如，可以将粉煤灰、矿渣、硅灰等工业废渣用作辅助性胶凝材料。例如，在美国，2010 年火力发电厂燃煤产生 118.1 Mt 粉煤灰(注：1 t 煤燃烧将形成 0.15~0.2 t 粉煤灰)，有 38% 用于施工和工业过程，水泥和混凝土工业利用超过 12.0 Mt。2008 年慢冷和粒化矿渣总量 17.1 Mt，其中粒化矿渣 2.7 Mt，94% 用作胶凝材料^[18]。

相对于其他材料，混凝土是消耗能源和排放温室气体最少的材料，甚至有研究表明^[19]，假设混凝土使用 100 年，其表层碳化将吸收水泥和混凝土生产过程释放的 CO₂ 达 33%~57%。比较常用的建筑材料的原料开采、运输和生产过程，钢筋混凝土的能耗是 2.5 GJ/t，钢 30 GJ/t，木材 2.0 GJ/t(图 1-1)。对于碳排放，混凝土结构为 550 kg/m²，而钢结构为 620 kg/m²^[20]。比较水泥混凝土与沥青混凝土路面，卡车在主要干线公路上运行 1 年，混凝