

JIANZHU CAILIAO XINJINZHAN
JI GONGCHENG YINGYONG

中国建筑学会建筑材料分会 主编



建筑材料新进展 及工程应用

中国建材工业出版社

建筑材料新进展及工程应用

中国建筑学会建筑材料分会 主编

中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑材料新进展及工程应用/中国建筑学会建筑材料

分会主编. —北京: 中国建材工业出版社, 2008. 11

ISBN 978-7-80227-489-1

I. 建… II. 建… III. 建筑材料—研究 IV. TU5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 161279 号

内 容 简 介

本书主要论述了绿色建筑及绿色建材的主要应用技术及特征, 旨在提高绿色建材在建筑中的广泛应用, 以有效提高社会资源合理分配与利用。

该书包括中国建筑学会建筑材料八个专业委员会的关于本专业材料的最新进展及工程应用情况。

此外, 本书还涉及国内外建筑材料最新发展动态及趋势, 新型建筑节能材料及其在工程中的应用, 绿色装饰装修材料与居室环境健康, 建筑材料绿色度评价技术及相关标准规范, 建筑材料与绿色建筑的关系, 工业废料及建筑垃圾的再生利用, 建筑节能材料相关技术, 面向建筑工业化的新型建材制品, 《绿色建筑评价标准》(GB 50378—2006) 介绍, 绿色建筑工程应用实例等方面内容的论文。

建筑材料新进展及工程应用

中国建筑学会建筑材料分会 主编

出版发行: 中国建材工业出版社

地 址: 北京市西城区车公庄大街 6 号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 19.25

字 数: 455 千字

版 次: 2008 年 11 月第 1 版

印 次: 2008 年 11 月第 1 次

书 号: ISBN 978-7-80227-489-1

定 价: 56.80 元

本社网址: www.jccbs.com.cn

本书如出现印装质量问题, 由我社发行部负责调换。联系电话: (010) 88386906

论文集编委会

主 编：张仁瑜

副主编（按姓氏笔画排序）：

王培铭 王肇嘉 江 涛 李晨光 肖 慧 赵霄龙
崔 琪 蒋 洋

编 委（按姓氏笔画排序）：

丁建彤	丁 威	于双全	王子明	王 元	王 玲
王胜年	王新友	王翠芬	乌力吉	白海波	关淑君
戎君明	刘加平	刘建生	孙诗兵	孙维理	伍社毛
朱家逵	伊 立	汪 维	宋淑敏	李昕成	李应权
李寿德	李清海	黄政宇	杨正宏	杨全兵	杨思忠
肖汉光	张永明	张 勇	孟小平	郑敏升	罗昭玲
施钟毅	徐 卫	徐 强	郭延辉	郭京育	高连玉
唐 明	康玉范	阎培渝	钱春香	钱觉时	黄 靖
黄新南	曹乃明	曹征富	覃维祖	蒋正武	傅 智
童明德	游劲秋				

前言

近年来,我国社会经济高速发展,能源和资源紧缺问题日益突出。为此,党和国家高度重视社会经济的可持续发展,高瞻远瞩地提出了科学发展观。建筑业的发展模式在很大程度上影响着整个社会的健康发展;我国的建筑业规模和增长速度遥遥领先于世界其他国家,所以,如何促进我国建筑业科学发展,将在很大程度上决定我国社会经济能否可持续发展。绿色建筑的提出及其推广发展,为建筑业可持续发展指出了一条切实可行的途径。

绿色建筑是指在建筑的全寿命周期内,最大限度地节约资源、保护环境和减少污染,为人们提供健康、适用和高效的使用空间,与自然和谐共生的建筑。概括起来,绿色建筑提倡“节能、节地、节水、节材、环保”。作为建筑业的物质基础,建筑材料行业的发展对建筑业的发展模式起着至关重要的作用。推进绿色建筑的发展离不开建筑材料新技术的发展。促进建筑材料技术的科学发展和可持续发展,揭示建筑材料技术与绿色建筑的关系,是广大工程技术人员面临的共同课题和共同使命,也是提升绿色建筑技术水平的关键环节之一。

对绿色建筑理念有益的建筑材料技术包括很多方面,例如材料节约技术、材料再生利用技术、节能材料技术、绿色装饰装修材料技术等等。近年来,我国工程技术界围绕绿色建筑的需要,对建筑材料新技术开展了大量的相关研究及推广应用,取得了一系列卓有成效的成绩。为了使这些建筑材料新技术能够为更多的技术人员和工程实践所共享,促进我国建筑材料技术及绿色建筑技术进步,借举办年会的良好契机,中国建筑学会建筑材料分会组织编撰了《建筑材料新进展及工程应用》论文集。本论文集收录了中国建筑学会建筑材料分会下设的混凝土基本理论及应用专业委员会、轻集料及轻集料混凝土专业委员会、墙体保温材料及应用技术专业委员会、建筑防水技术专业委员会、粉煤灰综合利用专业委员会、混凝土外加剂应用技术专业委员会、建筑装修专业委员会等分支机构撰写的相关行业发展报告,并收录了其他近20位作者的学术论文。根

据技术内容的特点,将论文集集中的报告内容分为混凝土及轻集料混凝土、混凝土外加剂、废弃物在建筑材料中的综合利用、建筑防水材料、墙体保温材料、建筑装饰材料等几大部分。

本论文集可供建筑材料领域及绿色建筑领域的工程技术人员和科研人员、大专院校师生以及其他对建筑材料和绿色建筑感兴趣的人员参考。由于水平所限,本论文集中难免有不足和疏漏指出,望广大读者予以批评指正。

张仁瑜 赵霄龙

2008年10月

目 录

第一部分 混凝土及轻集料混凝土

我国混凝土技术进展及工程应用

..... 中国建筑学会建材分会混凝土基本理论及应用专业委员会 (3)

我国轻集料和轻集料混凝土技术进展及工程应用

..... 中国建筑学会建材分会轻集料及轻集料混凝土专业委员会 (18)

再生混凝土集料特性及对水泥混凝土性能的影响研究 孙家瑛 蒋华钦 (48)

新加坡固体废弃物陶粒工艺技术设计方案 秦仙景 李寿德 (54)

高强轻集料自密实混凝土的试验研究 张乃城 杜在虎 (59)

冷轧螺旋肋焊接钢筋网陶粒混凝土平板静力结构性能试验研究

..... 仇心金 吴佳雄 查支祥 姜英波 华锦耀 何建明 吴 刚 (63)

轻集料混凝土及其制品在节能建筑工程中应用 宋淑敏 陈烈芳 (68)

第二部分 混凝土外加剂

我国混凝土外加剂技术进展及应用

..... 中国建筑学会建材分会混凝土外加剂应用技术专业委员会 (79)

烯丙基型聚羧酸系减水剂的合成及性能研究 黄雄荣 孙振平 (108)

第三部分 废弃物综合利用

我国粉煤灰行业技术进展及应用

..... 中国建筑学会建材分会粉煤灰综合利用专业委员会 (119)

建筑垃圾及其利用的探讨 陶有生 (144)

炉渣灰淤泥空心砖生产工艺及其质量管理 伍贤益 (147)

炉渣灰淤泥平瓦干燥裂纹的成因及防治 伍贤益 (153)

掺锰铁合金渣、铬铁合金渣水泥稳定层体系研究 罗 晖 徐馥琛 吴庆红 (157)

脱硫石膏对水泥-矿渣粉胶凝体系的激发作用 庞 敏 孙振平 (160)

“建科”透水砖的研制与工程应用研究 高庆强 (167)

第四部分 建筑防水材料

我国防水材料工程应用概览 中国建筑学会建材分会防水技术专业委员会 (181)

国家体育馆屋面柔性防水层施工技术 叶 军 王永成 许光宇 (187)

国家体育馆组合金属屋面系统施工技术 徐 宁 尹 佳 刘守宝 (193)

益生宜居 HJ 高效阻裂抗渗（防水）剂	俞锡贤（200）
---------------------------	----------

第五部分 墙体材料

国内外建筑砌块与墙板行业技术进展

..... 中国建筑学会建材分会建筑砌块与墙板专业委员会	（207）
------------------------------	-------

我国墙体保温材料及应用技术进展

..... 中国建筑学会建材分会墙体保温材料及应用技术专业委员会	（217）
----------------------------------	-------

蒸压加气轻质砌体/无机矿物隔热砂浆建筑结构自保温体系简述	俞锡贤（251）
------------------------------------	----------

重质墙体辅以夜间通风控制策略的节能性分析	高 清 李歧强（258）
----------------------------	--------------

第六部分 建筑装饰材料

我国建筑装饰材料及工程应用概览

..... 中国建筑学会建筑材料分会建筑装饰专业委员会	（271）
-----------------------------	-------

装饰装修工程室内空气质量控制实用方法	张 平 孙宏娟（286）
--------------------------	--------------

第七部分 其 他

基于模糊层次分析原理的建材绿色度综合评价 ... 易 成 石 晶 张仁瑜 赵霄龙	（293）
--	-------

第一部分

混凝土及轻集料混凝土

我国混凝土技术进展及工程应用

中国建筑学会建材分会混凝土基本理论及应用专业委员会

1 国内外技术现状和发展趋势

混凝土是经济发展和社会进步的重要基础原材料之一,在我国的需求量为材料之最。目前,我国每年建造房屋约 20 亿 m^2 ,高速公路约 5000km,还有大量的铁路、桥梁、港口等基础建设,仅混凝土一项就需要 40 亿 m^3 /年。相应的,我国水泥年产量逐年增长,2007 年已超过 13.5 亿吨,占世界水泥总量的 50% 以上。小康社会建设和城镇化的全面推进,乃至整个现代化建设的实施,预示着我国未来几十年的经济发展和社会进步对混凝土有着更大的需求。虽然混凝土的生产和应用已取得长足的进步,但仍存在着许多问题需要解决。尤为突出的是原材料生产过程中资源及能源消耗高、环境污染严重,使用效能低,与“全面、协调、可持续发展”的科学发展观相违背。解决这一问题的唯一出路就是提高水泥性能、科学地增加固体废弃物利用量,有效地使用化学外加剂,理性地设计混凝土材料。这就需要针对新的形势和需求以及存在的问题,对混凝土进行深入系统的研究,以理论研究为基础,推动水泥和混凝土的开发和工程应用。

近年来,国内外一直重视水泥混凝土的高性能化、高强度、多功能和绿色化。先进工业国家如美国、加拿大、日本、印度及欧洲诸国先后投入巨资建立先进水泥基材料研究中心、高性能混凝土研究网或开展水泥材料的基础研究。如 1996 年,法国公共工程部、教育与研究部又组织了为期 4 年的国家研究项目“高性能混凝土 2000”,投入研究经费 550 万美元。美国于 1994 年提出了一个在基础设施工程建设中应用高性能混凝土的建议,并决定在 10 年内投资 2 亿美元进行研究和开发。瑞典 1991 年~1997 年由政府和企业联合出资 5200 万克朗,实施高性能混凝土研究的国家计划。日本早在 20 世纪 60 年代就开始研究并制成数十座高强混凝土铁路桥。在 80 年代后期研制开发高性能 C60~C80 的高强混凝土,而且利用该混凝土时,尤其重视混凝土的施工性能,特别是高流动性,要求浇筑混凝土后不振或微振。采用免振自密实混凝土超过 80 万 m^3 。目前日本已研制出使用寿命在 500 年以上的超高耐久性混凝土。我国在“九五”期间就有重大科技攻关项目“重点工程混凝土安全性的研究”;“十五”和“十一五”期间科技部和国家自然科学基金委员会也在这一领域设立了重点和重大项目,开展高性能水泥混凝土、机敏水泥基材料及其结构行为的研究。国内许多科研院所和高校加入这一研究行列。而研究热点主要集中在水泥熟料的烧成、水泥浆体结构的形成、化学外加剂、矿物掺合料的合理使用,并促进水泥和混凝土材料科学理论发展,形成一些新观念。

1.1 混凝土的生态化(包括工业废弃物的综合利用)

工业发达国家关于城市废弃物的利用技术的投入明显高于我国,其最显著的优势是在各

种废渣处理和利用成套技术的基础上建立了严格、完善的规章、规范,强制各种城市垃圾、建筑废弃物等收归专业的企业进行处理和利用,不仅从法律角度限定所有废渣必须经过处理,而且制订相应的经济政策保障处理和利用废渣的企业正常运行。日、德等国已基本上做到零污染、零排放,各类废弃物的最大利用途径就是生产水泥和混凝土。发达国家利用废弃物生产生态水泥已有成熟的经验,日本 40 多家水泥企业,其中 50% 以上工厂处理各种废弃物,日本麻省水泥公司用下水道污泥及城市其他废弃物生产出高强度水泥;在欧洲水泥生产者联合会所属的水泥厂中每年焚烧处理 100 万吨有害废物。美国的大部分水泥厂都利用废料煅烧水泥,技术成熟、应用普遍。人们已经认识到,水泥回转窑在处理有毒危险废弃物方面比焚煤炉更有优越性,主要是利用可燃性有毒废弃物(包括固态、液态、气态)代替部分或大部分燃煤和燃油煅烧水泥,既处理了废料,又节约了能源。日本等国已有将城市垃圾焚烧处理与水泥熟料生产一体化的工业化试验研究。

在国家自然科学基金委和国家 863 计划委员会的大力支持下,我国的生态材料的研究取得了长足的进步和发展,在典型材料的环境协调性评价(MLCA)、LCA 的方法学、冶金渣的回收利用等方面作了大量工作,在城市垃圾焚烧飞灰、废石膏等固体废弃物的处置利用及生态水泥方面做了一些研究。

碱激发水泥基材料是最近 30 多年国际上水泥制造技术发展的一个方向,被公认为是本世纪水泥技术最有前景的发展方向,目前国际上已有 30 多个国家成立了专门研究这种材料的研究所。但我国在这方面的研究还很弱,尽管如此,仍取得一些研究成果,如发现地聚合物复合水泥(GBC)混凝土的干缩小于普通混凝土,抗裂性能高于普通混凝土,具有较好的抗硫酸盐侵蚀性能,其水溶性氯离子有效扩散系数只有普通混凝土的 17%;随着聚合物掺量的增加,水泥水化物中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 数量减少,水泥混凝土的微观结构得到改善,混凝土的路用性能得以显著提高,复合式路面使用性能优异;利用由碱激发偏高岭土得到的地聚合物与轻集料陶砂制备出的地聚合物基轻质混凝土具有很好的力学性能和耐高温性能。

国外先后在部分水泥中掺入矿渣、粉煤灰、火山灰、页岩、石灰石等作为混合材料。我国每年排放出各类固态工业废弃物近 10 亿吨,自 20 世纪 50 年代就采用掺加一些天然矿物如火山灰和工业废渣如矿渣、粉煤灰作为水泥生料的原材料;后又作为水泥熟料的混合材,以增加水泥产量的措施,解决水泥需求问题。后来发展到研究钢渣、煤矸石和石灰石作为混合材的可能性。

近年来,国内外在高性能混凝土制备过程中掺加超细的矿渣粉或(和)粉煤灰,改善了亚微观结构。对粉煤灰在水泥混凝土中的作用机理提出了滚珠效应、填充效应和表面水化效应。掺加少量 $0.1\mu\text{m}$ 左右的硅灰(SiO_2),可以制备高强混凝土。这些掺合料因在某种程度上具有胶凝性质,因此,近年来被称为辅助胶凝材料,又称为混凝土第六组分或矿物外加剂。

利用矿物外加剂可配置高性能混凝土和特种功能混凝土,并把原来矿物掺合料简单的代替水泥观念,提升到作为混凝土辅助性或性能调节型胶凝材料的高度来认识,对高性能混凝土材料设计和性能优化有重要的启示意义。在应用基础理论上,提出了辅助胶凝材料复合胶凝效应理论(包括诱导激活效应、表面微晶化效应及界面耦合效应等),建立了胶凝组分优化配伍理论与模型。在制备技术上,提出了机械力活化和化学活化技术路线,根据颗粒群特

征定量体视学分析,提出了最紧密堆积和颗粒形状匹配理论,解决了生产工艺关键技术。在应用上,提出了辅助胶凝材料商品化的概念,使辅助胶凝材料发展成为混凝土的矿物外加剂。

1.2 水泥基材料的改性

水泥基材料的改性主要体现在下列混凝土材料系列中:高强混凝土、高性能混凝土、自密实混凝土、聚合物水泥混凝土和纤维增强混凝土。

近些年来,化学外加剂的应用,使混凝土的工作性能大大提高。这也造成混凝土技术的一场革命。超塑化剂还能改善硬化浆体和集料的界面结构。

外加剂的发展非常迅速,在欧洲和日本已相继发展到第三代产品,成为制备高性能混凝土和特种混凝土的必需组分。我国的商品混凝土中也几乎无例外地掺用混凝土外加剂。外加剂的发展无疑对提高混凝土质量和经济效益起着重要作用。但我国在混凝土外加剂的生产和应用方面存在很多问题,特别是外加剂的生产和应用都是拿来主义,缺乏科学和理论的指导。但是,由于外加剂掺入量非常少,其作用机理尚无法解释,因此在应用过程中许多缺陷无法解决。

在聚合物改性水泥基材料已有 80 余年的历史,20 世纪 70 年代以后,世界范围对这一领域的研究兴趣与日俱增。聚合物改性水泥基材料有良好的粘结性和耐水性,配置工艺与普通水泥砂浆基本相同,不需要潮湿养护,收缩与普通砂浆相同或略低一些,强度较高,弹性模量较低,抗冻融性和抗渗性好,是水工建筑、海洋以及港口建筑、普通工业与民用建筑、地下建筑结构、道路与桥梁等的良好的修补材料。但聚合物改善性能的机理尚不十分清楚。

活性细粉混凝土(Reactive Powder Concrete-RPC)是一种超高强的混凝土,其立方体抗压强度可达 200~800MPa,抗拉强度可达 25~150MPa,断裂能可达 30000J/m²,单位体积重量为 2500~3000kg/m³。制成这种混凝土的主要措施是:减小颗粒的最大尺寸,改善混凝土的均匀性;使用细粉及极细粉材料,以达到最优存储密度(Packing density);减少混凝土用水量,使非水化水泥颗粒作为填料,增大存储密度;增放钢纤维以改善其延性;在硬化过程中,加压及加温使其达到很高的强度。国内采用国产细粉材料,加入适量钢纤维,已研制成 C180~C360 级的 RPC。

我国从 20 世纪 90 年代开始免振捣自密实混凝土的研究,目前已广泛应用于水电站、桥梁、高层建筑等各种工程。如三峡工程的泵站引水压力管道,钢筋密集,采用自密实高性能混凝土,取得了较好的施工效果;公伯峡水电站的压力钢管水平段及厂房中钢筋过于密集部位分别采用了 C20、C30 自密实高性能混凝土;地处云贵高原的内昆铁路李子沟特大桥高墩采用 C28 自密实混凝土施工。我国对自密实混凝土的研究发展比较迅速,但基本上都是针对当地材料进行的混凝土工作性能评价及配合比设计,未形成统一的标准和规范,还需作进一步的研究,另外自密实混凝土的高流动性、粘聚性和强度不稳定,仍没有完善的措施进行指导。

钢纤维增强聚合物混凝土比钢纤维混凝土在力学性能上有大幅度的提高,其在梯面大桥桥面铺装中的应用,也得到了相同的结论。

1.3 混凝土结构-功能一体化

从20世纪90年代末国内开展了混凝土结构-功能一体化的研究。混凝土结构-功能一体化是指集混凝土的结构性能与多种功能于一身,即混凝土材料在增强、增韧等力学性能的同时,又拥有多种良好的功能特性,如混凝土性能的自感知和自调节、混凝土损伤的自诊断和自修复。国内已研制开发了激光三角量测装置,可以对任意断裂面进行数字化三维重构,建立了表征断裂面特性的若干参数,揭示了材料组成、宏观力学性能与断裂面参数的内在联系。在此基础上并利用材料层次模型,提出用混杂纤维增强增韧混凝土的理念,实现了混凝土的低成本高韧性。同时提出了融自然愈合、基体增强和有机物释放等机制为一体的混凝土裂缝自愈合的技术路线:通过在混凝土传统组分中复合活性无机掺合料、微细低弹模纤维和有机化合物,在混凝土内部形成自增强、自愈合网络,有效减少早期微裂纹和细化削弱后期裂缝尖端的应力集中,实现对混凝土材料微裂缝的自愈合。混凝土结构-功能一体化的研究具有多学科综合性和涉及课题前瞻性等特点,不仅从整体上提升了混凝土材料的研究水平,拓宽了混凝土材料创新思路 and 理念。国家自然科学基金委员会也在这一领域设立了重点项目,开展机敏水泥基材料及其结构行为的研究。

在目前的太阳能建筑中利用以水泥基材料的显热方式储存热能为主的储能材料,虽然显热储能的储能密度不高、体积较大,但具有成本低和储能性能长期稳定的优点。

有人将自密实混凝土(Self-compacting concrete)、内养护混凝土和承受高温的高强混凝土纳入机敏混凝土的范畴。

1.4 水泥基材料的耐久性

除了追求材料的高强度以外,人们对耐久性和环境问题也日益重视。国内外对碱-集料反应、钢筋锈蚀、冻融破坏、硫酸盐侵蚀、碳化等进行过大量研究。毫无疑问,高强度、长寿命、低环境负荷是当代水泥材料发展的主要方向。水泥基材料的界面结构、环境行为、失效机理和寿命预测问题,是当今水泥和水泥混凝土材料科学面临的重大课题。水泥混凝土的耐久性,主要是指水泥混凝土构筑物在服役期间抵御环境介质侵蚀的能力。由于环境介质不同,其失效机理也不同。从材料学的观点看,水泥混凝土的耐久性主要是由水泥石的结构和水泥石与集料的界面结构所决定的。提高水泥石耐久性的主要途径,一是提高抵御侵蚀性介质进入水泥石内部的能力;二是提高水泥石诸组分在侵蚀介质作用下的稳定性。

人们越来越重视恶劣环境条件下混凝土耐久性和受灾混凝土构筑物安全性评估的研究。在材料损伤学和传热学理论上提出了混凝土材料损伤热学分析方法和理论,建立了火灾混凝土损伤缺陷红外热像-电化学综合模型。在混凝土构筑物抗冻(抗盐冻)成套技术应用基础理论方面,提出了混凝土盐冻破坏的饱水度、盐结晶压和化学侵蚀综合作用机理,采用现代计算机技术和神经网络技术,实现了用计算机自动进行混凝土抗冻性设计、诊断和评估。但这些研究还是初步的、零星的,还没有得到能应对所有环境的设计、诊断和评估模型。

1.5 水泥混凝土材料的表征和评价

近年来,定量体视学在混凝土材料体系中的应用研究方兴未艾。该领域已开展的研究可

归为两个方面：一是应用基础研究，主要包括研究混凝土材料的自动图像分析仪软件设计、实验设计、数据处理方法、样品制备方法以及较为关键的数字图像分析和处理方法等；二是针对混凝土材料三维组成结构特征参数的测量分析研究，主要涉及胶凝材料中孔结构和矿物相的定量分析，混凝土中含浆量的测定，混凝土中粗集料级配、尺寸、形状分析、混凝土组分、孔结构对力学性能的影响，显微结构分析等内容。由于混凝土体系的复杂性和随机性，定量体视学在混凝土体系中的应用尚存在一系列关键技术问题有待突破。

材料环境负荷的具体化、指标化、量化是开发生态环境材料的基础。材料的环境负荷评价涉及材料寿命周期中的环境问题，目前利用 LCA 方法对材料的环境负荷进行评价已被大多数材料科学工作者所接受。目前 LCA 的研究主要集中在 LCA 方法学、典型材料（产品）评价示范、LCA 在生态设计中的应用。LCA 方法学的研究主要集中在影响评价阶段，国际上有代表性的方法主要有瑞典的 EPS 方法，荷兰的 Ecoindicator 方法，丹麦的 EDIP 方法，瑞士的临界体积方法等。我国在这方面的研究才刚刚起步，没有形成自己的理论体系。

1.6 混凝土的轻质化

当今国外发达国家高性能轻集料混凝土的应用已取得了丰富的经验。CL50 ~ CL60 轻集料混凝土已在工程中大量使用，结构轻集料混凝土的抗压强度最高为 80MPa，其表观密度在 1800 ~ 2000kg/m³ 之间。

20 世纪 90 年代初期，挪威、日本等国家研究了高性能轻集料混凝土的配方、生产工艺、高性能轻集料等，重点在于改善混凝土的工作性和耐久性，并取得了一定的成果：1993 年以来，美国每年轻集料使用量都在 350 ~ 415 万 m³，其中用于结构混凝土部分在 80 万 m³ 左右。英国采用高强轻集料混凝土建造了北海石油平台；挪威已成功应用 CL60 级轻集料混凝土建造了世界上跨度最大的悬臂桥；日本则在 1998 年成立了一个由 18 家公司组成的高强轻集料混凝土研究委员会，专门研究粉煤灰轻集料混凝土。

目前国内如广州、乌鲁木齐、昆明、黑龙江和京津唐地区已成为超轻陶粒生产基地。上海生产出堆积密度为 700 ~ 800kg/m³ 的粉煤灰陶粒和 500kg/m³ 以下的超轻陶粒；湖北宜昌生产的高强陶粒，可以配制出强度等级为 CL30 ~ CL60 或更高的轻集料混凝土。随着宜昌、上海等地高强、高性能轻集料的规模化生产，高强轻集料混凝土、结构轻集料混凝土在我国已逐步应用。

轻质混凝土的发展趋势主要体现在下列方面：

(1) 研制新型轻集料。有人用废玻璃制作出表观密度 0.18g/cm³，吸水率 11% 的轻集料，用它和 Na₂O 含量 0.92% 的波特兰水泥制作的试件没出现体积膨胀或裂纹。用硅酸钠对木材进行处理后，成功制出了强度满足 ASTM C129 非承重标准的轻集料混凝土，它的密度和耐久性也都达到了要求。再生泡沫聚苯乙烯（EPS）在建筑领域主要用作混凝土轻集料，由于颗粒的密度特别低、绝热性良好、封闭结构基本不吸水，从而可制成热工性能优异的超轻型保温制品，并且综合生产成本较低，经济效益可观，目前已在海外得到广泛的生产和应用。另外，人造陶粒也朝着绿色、环保方向发展，利用淤积海泥、尾矿粉、硅藻土等烧制的许多新型陶粒相继涌现。

(2) 采用矿物掺合料技术。混凝土高性能化的重要技术手段就是采用复合技术，在轻

混凝土中掺加粉煤灰、矿渣和硅灰等矿物掺合料已成为改善工作性能的重要途径。一方面,矿物掺合料密度比水泥小,用它取代部分水泥,可以有效降低水泥砂浆的密度,减少轻集料的上浮,并能减缓混凝土的水化过程、减少坍落度的经时损失,有利于泵送施工;另一方面,矿物掺合料对轻集料混凝土的强度也有所贡献,较大的比表面积和表面能,使它更易吸附并粘结在轻集料的表面上,和水泥一起在其表面上形成强度较高的壳结构,提高了轻集料的强度,因此也就提高了轻集料混凝土的强度。

(3) 发展高性能轻集料混凝土。发展高性能轻混凝土的关键是轻集料的性能。高性能轻集料的获得主要有两条途径:一是将普通轻集料的外表面喷涂一层如石蜡、聚苯乙烯乳液等防水涂料,以降低或消除其吸水率,这种方法虽然有效,但是却使得轻集料的生产过程变得复杂,而且对集料-浆体界面结合有不利影响;另一种则是选用特殊的原材料,采用专门的生产工艺加工出的高性能轻集料,因为它内部气孔细小、均匀、呈球形且互相封闭,所以吸水率很低。这种轻集料在日本的研究较多,主要有两种:一种是以90%的粉煤灰、适量膨润土和碳酸钙、煤粉混合,成球,在1200~1300℃下煅烧膨胀而成;另一种是以珍珠岩、流纹岩等火成岩为主要材料、添加辅助材料和发泡剂,经粉碎、混合、脱水、干燥、造粒、预热、焙烧和冷却而制成。我国学者与日本合作进行研究,利用我国资源,制造出这种高性能轻集料。此轻集料在真空下的低吸水率,使它具有良好的可泵性和抗冻性。

2 国内技术存在问题及与国外先进技术的差距

2.1 高性能混凝土

我国关于高性能混凝土的研究已经取得一定的成果,但是还有许多材料与工程方面的难题需要解决:

(1) 对于矿物外加剂的应用依然停留在利用工业废渣的认识水平上,还没真正挖掘出矿物外加剂对混凝土综合性能的贡献;另外,有些学者夸大了掺合料的作用,没有正视矿物外加剂在应用中存在的问题。

(2) 对混凝土耐久性的研究依然是逐个因素孤立的进行,而实际工程结构是在应力或非应力与不同化学腐蚀疲劳条件共同作用下运行的,单因素作用下的耐久性难以反映客观实际。

(3) 材料组成结构与性能的关系是近代材料科学的一个核心问题;为使高性能混凝土的各种性能得以进一步提高,必须对材料组成的粒子尺寸、级配、孔结构、集料界面区结构以及组分间的相互作用、物理力学、化学性质的差别等进行研究。

(4) 高效减水剂与水泥和矿物外加剂之间、复合使用外加剂时的几种外加剂之间的相容性,以及如何更好地发挥叠加效应等问题尚未解决,主要是我国水泥品种繁多,且水泥化学组成和矿物组成差别很大。

(5) 研究成果与实际应用脱节;由于混凝土的一些性能,尤其是耐久性的评价周期较长,实际工程缺少长效的工程质量监督体系,大量研究成果不被实际工程重视,造成研究成果资源浪费;从设计到施工的工程技术人员缺少高性能混凝土的知识。

2.2 轻集料混凝土

在我国,轻集料混凝土应用已近 50 年了,其应用范围已扩大到土木工程建筑的各个领域,但是由于其存在一系列的问题,影响和制约了其应用的进一步扩大和发展。

(1) 分层离析问题

轻集料混凝土主要是由轻集料、细集料、胶结材和水组成。这四种组分的密度各不相同,在混凝土拌合后会产生分层现象。轻集料本身的表面特性对新拌混合物的分层度影响很明显。表面较光滑或呈球形的陶粒抗离析性较差,表面多孔而粗糙或呈碎石形的陶粒抗离析性较好。粗集料的绝对体积越大,混凝土拌合物的分层度也越大。

(2) 泵送问题

轻集料混凝土中集料与胶凝材料易离析而影响泵送施工,存在的问题:一是当增加泵压时,混凝土中的空气被压缩到轻集料中,当泵压降低和消失后,存在于轻集料孔中的被压缩空气又会将轻集料孔中的水分挤出。如果这种情况发生在细管中,会导致混凝土拌合物泌水并会堵塞泵。二是当混凝土泵送到浇筑现场,在轻集料中被压缩的空气又会挤出水分,这将影响集料与水泥石之间的界面组成和结构。三是泵送前后混凝土强度的损失以及由于泵送引起的混凝土耐久性问题。在混凝土流出泵后,由于泵送力的突然释放,轻集料内的水分又会随着压力的降低突然释放(泵出),泵出的水将冲刷集料与水泥浆的过渡带,破坏轻集料与水泥石的粘结,进而导致混凝土力学性能和耐久性下降。

(3) 抗裂性能

由于轻集料混凝土的水泥用量较高,集料弹性模量低和限制水泥石收缩变形的能力小以及轻集料粒径和表面特征不合适导致水泥用量增多等原因,都会造成收缩增大,最终导致建筑物结构的开裂。

(4) 抗冻融性能

影响轻集料混凝土的抗冻融性能最为重要的因素是轻集料的饱水程度,采用完全饱和的轻集料配制混凝土,由于轻集料内部的孔的饱水程度较高,一旦这些孔中的水结冰发生膨胀,轻集料内部就没有足够的空间来吸收膨胀应力,因此混凝土将遭受严重的冻融损坏。轻集料的饱水度高于 90% 将导致混凝土的抗冻融性能变差,但轻集料最适宜的饱水程度目前还没有报道,需进一步研究。

(5) 延迟钙矾石(DEF)问题

轻集料混凝土由于水泥用量高以及轻集料的多孔性使混凝土的保温性能好,轻集料混凝土内部的温度最高可以达到 80℃ 以上。而据报道,当温度达到 70℃ 以上时就有可能发生 DEF,而且轻集料混凝土内部由于轻集料吸水作用将会使得内部湿度大,在高温与潮湿的条件下,发生 DEF 的可能性进一步加大。但是,DEF 对轻集料混凝土的体积稳定性的影响可能不同于普通密度混凝土,其原因是轻集料的多孔作用会缓解由于 DEF 引起的体积膨胀问题,因而其影响有可能减弱。

2.3 聚合物混凝土

在聚合物水泥混凝土方面还有下列矛盾没有解决: