

混凝土新技术丛书

Green High Performance Concrete Technology

绿色

冷发光 丁威 纪宪坤 田冠飞◎著

高性能混凝土技术



中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

绿色高性能混凝土技术 / 冷发光等著. —北京:

中国建材工业出版社, 2011. 11

ISBN 978-7-5160-0021-2

I. ①绿… II. ①冷… III. ①高强混凝土

IV. ①TU528. 31

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 184291 号

内 容 简 介

本书是对作者从事绿色高性能混凝土技术研究的总结。首先从绿色高性能混凝土 (GHPC) 的配制技术入手, 介绍了高效外加剂、低品质矿物掺合料、机制砂、再生水在 GHPC 中的应用技术, 之后重点研究了 GHPC 的收缩开裂性能、脆性、耐火性能、荷载作用下的抗氯离子和抗硫酸盐侵蚀性能, 最后介绍了 GHPC 的工程应用案例。

本书可供土木工程、港口水运、水利工程、桥梁市政、建筑材料、工程管理等技术领域的科技人员、大专院校师生和研究生参考。

绿色高性能混凝土技术

冷发光 丁威 纪宪坤 田冠飞 著

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: 710mm × 1000mm 1/16

印 张: 15

字 数: 292 千字

版 次: 2011 年 11 月第 1 版

印 次: 2011 年 11 月第 1 次

定 价: 38.00 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

前 言

绿色高性能混凝土 (GHPC, green high performance concrete) 是吴中伟院士等最早提出来的概念, 是解决水泥混凝土行业快速发展引起的资源、能源和环境问题的主要措施之一。GHPC 的主要特点是从生产制造、使用到废弃的整个周期中, 最大限度地减少资源和能源的消耗, 并保证混凝土拌合物性能、力学性能和耐久性能, 延长建筑物的使用寿命。

随着国家对节能减排、混凝土结构耐久性的重视, 绿色高性能混凝土技术得到了快速的发展。绿色高性能混凝土中使用了高效外加剂, 掺加了工业废渣, 甚至使用了新型骨料或其他低品质原材料, 了解和掌握新技术有利于避免一些应用问题。本书结合了作者多年的研究成果, 从外加剂、低品质矿物掺合料、机制砂、再生水等原材料方面研究了绿色高性能混凝土的材料组成及基本性能; 研究了绿色高性能混凝土的收缩开裂性能、脆性、耐火性能、荷载作用下的抗氯离子和抗硫酸盐侵蚀性能, 并提出了改善措施; 最后结合案例介绍了绿色高性能混凝土的工程应用情况。

本书由冷发光、丁威、纪宪坤、田冠飞著, 由冷发光统稿和定稿。本书主要内容是根据科技部科研院所技术开发研究专项资金项目“绿色高性能混凝土关键技术研究”(2003EG131152)的研究成果, 并参考了冷发光的博士论文“荷载作用下混凝土氯离子渗透性及其测试方法研究”的有关内容提炼总结而成。本项目研究过程中得到了科技部、云南省科技厅、中国建筑科学研究院等主管部门的大力支持, 本书的部分内容还借鉴了云南省省院省校科技合作项目“利用地方材料开发应用绿色高性能混凝土”(2004YX31)和“共建云南建工集团混凝土技术创新中心”(2005YX19)的有关研究成果, 研究成果在工程中的应用得到了中建商品混凝土有限公司(原中建三局商品混凝土公司)和云南建工混凝土有限公司等单位的大力支持和帮助。本书第8章的部分研究成果系在深圳大学完成, 我的博士生导师清华大学冯乃谦教授和学长深圳大学邢锋教授等为第8章尤其是8.4.1节的主要完成者。我的同事: 张仁瑜、丁威、郭向勇、田冠飞、赵霄龙、马冬花、郭延辉、薛庆、刘岩、郭京育、马

孝轩、王征、王宇杰、张秀芳、韩素芳、黄小平，以及众多好友：李昕成、李章建、王军三位总工和前辈顾晴霞教授等都为本书做出了不同程度的贡献。在此一并表示诚挚的感谢！

由于作者水平有限，书中定有不妥和疏漏之处，衷心希望读者给予批评指正。

中国建筑科学研究院
全国混凝土标准化技术委员会
建研建材有限公司
冷发光
2011 年 7 月于北京

目 录

绪论	1
1 资源与环境问题	1
2 绿色高性能混凝土 (GHPC)	3
3 绿色高性能混凝土 (GHPC) 研究现状	4
4 存在问题及发展趋势	6
4.1 存在的问题	6
4.2 发展趋势	7
参考文献	8
第1章 低收缩环保型高性能减水剂	10
1.1 研究背景	10
1.2 聚羧酸系高性能减水剂的研制	12
1.2.1 聚羧酸系高性能减水剂研制目标	12
1.2.2 聚羧酸系高性能减水剂合成原理	12
1.2.3 聚羧酸系高性能减水剂的研制	16
1.3 聚羧酸系高性能减水剂的性能	17
1.3.1 聚羧酸系高性能减水剂匀质性	17
1.3.2 水泥净浆流动度及经时变化	17
1.3.3 对新拌混凝土性能影响	20
1.3.4 对硬化混凝土性能影响	23
1.3.5 第三方质量检测结果	27
1.4 产品特点与应用范围	28
参考文献	29

第2章 低品质掺合料的开发利用	30
2.1 前言	30
2.2 原材料性能与制备方法	32
2.2.1 原材料性能	32
2.2.2 复合掺合料制备方法	32
2.3 复合掺合料性能	33
2.3.1 化学组成	33
2.3.2 细度	34
2.3.3 需水量比和净浆流动度	35
2.3.4 活性指数	36
2.3.5 水化热	37
2.4 复合掺合料在混凝土中的有效利用	37
2.4.1 混凝土抗压强度	38
2.4.2 混凝土耐久性能	40
2.5 大掺量复合掺合料混凝土性能	43
2.5.1 力学性能	44
2.5.2 混凝土抗冻融性能	45
2.5.3 混凝土抗氯离子渗透性能	46
2.5.4 混凝土抗碳化性能	47
2.5.5 混凝土收缩性能	48
2.5.6 混凝土早期开裂性能	48
参考文献	50
第3章 复合掺合料机制砂混凝土技术	52
3.1 前言	52
3.2 原材料性能	54
3.2.1 复合掺合料	54
3.2.2 粗骨料	55
3.2.3 细骨料	56
3.3 复合掺合料机制砂混凝土配合比设计	56
3.3.1 混凝土强度总体规律	57
3.3.2 水胶比对混凝土强度的影响	58

3.3.3 掺合料种类对混凝土强度的影响	59
3.3.4 复合掺合料掺量对强度的影响	60
3.3.5 复合掺合料机制砂混凝土基本配合比	61
3.4 经济掺量复合掺合料机制砂混凝土性能	62
3.4.1 力学性能	62
3.4.2 抗氯离子渗透性能	64
3.4.3 收缩开裂性能	65
3.4.4 水化热	67
3.5 大掺量复合掺合料机制砂混凝土性能	68
3.5.1 拌合物性能	68
3.5.2 力学性能	69
3.5.3 耐久性能	71
3.6 成本对比分析	73
3.6.1 原材料成本	73
3.6.2 成本核算的机制砂混凝土配合比	73
3.6.3 复合掺合料混凝土与单掺粉煤灰混凝土成本对比	74
3.6.4 实际生产混凝土成本	75
参考文献	76

第4章 混凝土收缩开裂性能与控制措施 78

4.1 前言	78
4.2 收缩开裂性能测试方法	80
4.2.1 收缩测试方法	80
4.2.2 开裂测试方法	84
4.3 收缩开裂性能影响因素	88
4.3.1 混凝土强度等级	88
4.3.2 水泥品种	90
4.3.3 矿物掺合料	92
4.3.4 减水剂	97
4.4 混凝土收缩开裂控制技术	100
4.4.1 材料方面的综合控制措施	100
4.4.2 施工方面的综合控制措施	102
参考文献	103

第5章 高强混凝土脆性及改善措施	106
5.1 高强混凝土的应用	106
5.2 高强混凝土脆性问题	108
5.2.1 高强混凝土的脆性断裂	108
5.2.2 混凝土的脆性特点	109
5.2.3 混凝土的脆性指标	110
5.3 高强混凝土脆性研究	112
5.3.1 原材料与研究方法	112
5.3.2 C60 混凝土脆性	114
5.3.3 C80 混凝土脆性	116
5.3.4 两种不同强度等级混凝土试件脆性对比	117
5.4 高强混凝土脆性改善措施	119
参考文献	120
第6章 高强混凝土耐火性能与改善措施	122
6.1 前言	122
6.2 混凝土的耐火性能	123
6.2.1 火灾中混凝土破坏机理	123
6.2.2 高温下的混凝土力学性能	124
6.2.3 高温后的混凝土性能	126
6.3 C60 高性能混凝土耐火性能	127
6.3.1 原材料与研究方法	127
6.3.2 C60 混凝土耐火性能	133
6.4 混凝土耐火性能改善措施	137
参考文献	138
第7章 荷载作用下混凝土抗氯离子渗透性能	140
7.1 氯离子对混凝土性能影响	140
7.1.1 混凝土中的氯离子	140
7.1.2 氯离子对混凝土性能的影响	140
7.1.3 氯离子引发钢筋锈蚀问题	144
7.2 荷载和裂纹对混凝土氯离子渗透性的影响	145

7.3 研究目的与研究方法	147
7.3.1 研究目的	147
7.3.2 研究方法	148
7.4 长期持续荷载对素混凝土氯离子渗透性的影响	152
7.4.1 氯离子渗透深度与时间的关系	153
7.4.2 氯离子渗透深度与荷载水平的关系	154
7.5 长期持续荷载对钢筋混凝土氯离子渗透性的影响	156
7.5.1 对氯离子含量的影响	156
7.5.2 对氯离子扩散系数的影响	158
7.5.3 氯离子扩散系数与荷载水平的数学模型	158
7.6 短暂持续荷载对混凝土氯离子渗透性的影响	160
7.6.1 短暂持续荷载对混凝土导电量的影响	160
7.6.2 短暂持续荷载对混凝土氯离子扩散系数的影响	164
7.7 荷载作用下氯离子对混凝土结构的损伤破坏机制和对策	168
7.7.1 荷载作用下氯离子对混凝土结构的损伤破坏机制	168
7.7.2 防治氯盐侵蚀的对策	168
参考文献	170
第8章 荷载作用下混凝土抗硫酸盐侵蚀性能	174
8.1 混凝土结构硫酸盐腐蚀概况	174
8.2 硫酸盐腐蚀的研究现状	175
8.2.1 试验方法	175
8.2.2 研究进展	176
8.3 硫酸盐对混凝土结构的腐蚀机理	180
8.4 荷载作用下混凝土抗硫酸盐侵蚀性能	182
8.4.1 硫酸钠侵蚀	182
8.4.2 硫酸铵侵蚀	192
参考文献	198
第9章 再生水和循环水在混凝土中的应用	202
9.1 引言	202
9.2 再生水在混凝土中的应用	202
9.2.1 城市再生水	202

9.2.2	技术方案	203
9.2.3	结果与分析	205
9.2.4	小结	210
9.3	循环水在混凝土中的应用	211
9.3.1	原材料与配合比	211
9.3.2	试验结果与分析	212
9.3.3	小结	215
	参考文献	215
第10章	绿色高性能混凝土工程应用	216
10.1	FS 复合掺合料混凝土工程应用	216
10.1.1	工程概况	216
10.1.2	原材料	216
10.1.3	配合比的确定	217
10.1.4	生产设备	219
10.1.5	生产质量控制	219
10.1.6	混凝土泵送施工	220
10.1.7	结构质量以及混凝土强度统计评定	221
10.1.8	资源及经济效益评估	222
10.2	机制砂低水泥用量 C60 高性能混凝土工程应用	222
10.2.1	工程概况	222
10.2.2	混凝土配合比试验及水化热对比	223
10.2.3	混凝土生产与施工	227
10.2.4	混凝土强度	228
10.2.5	小结	229

绪 论

1 资源与环境问题

近年来,我国重大混凝土基础工程建设迅猛发展,水泥产量和混凝土用量持续保持快速增长,如图 1-1 所示。2009 年我国水泥产量达到了 16.3 亿 t,预拌混凝土用量达到了 7.9 亿 m^3 ,2010 年水泥产量达到 18.68 亿 t,预拌混凝土用量达到了 10.4 亿 m^3 。水泥及混凝土在为人类带来方便、财富和经济快速发展的同时,带来了不可避免的巨大负面影响,主要是能源和环境问题。

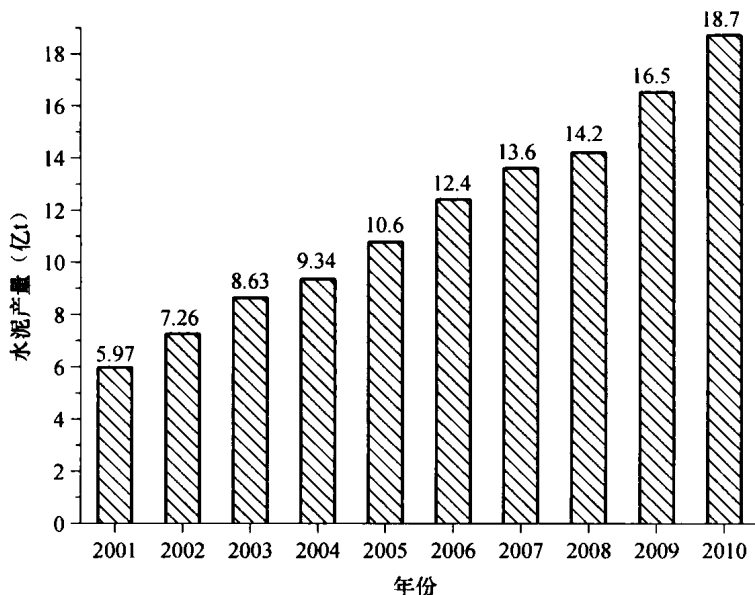


图 1-1 2001 ~ 2010 年我国水泥产量统计图

(1) 粉尘和烟尘污染

水泥生产时第一个生态问题是粉尘和烟尘。粉尘是在水泥工业过程中产生的,烟尘是燃料燃烧的产物。工业用煤排烟量大致是燃烧质量的 3% ~ 18%,褐煤为 11%,无烟煤为 8% ~ 9%。烟尘中一般含有硫、氮、碳的氧化物等有

毒气体和粉尘。粉尘颗粒大于 $10\mu\text{m}$ 的，很快落到地面，称为落尘；颗粒小于 $10\mu\text{m}$ 的称为飘尘，其中相当大一部分比细菌还小，可以几小时，甚至几天、几年漂浮在大气中，尤其是直径 $0.5 \sim 5\mu\text{m}$ 的飘尘，不能为人的鼻毛所阻滞和呼吸道黏液所排除，可以直接到达肺泡，被血液带到全身。有的飘尘还附有苯或本身就是一些有毒的金属（如铬、铍、镍）化合物、石棉、砷化物等，可以致癌。细小的飘尘随呼吸道进入人体后将有一半黏附在肺部的细胞上，是构成人类和动植物呼吸道疾病的重要原因。

（2） CO_2 引起大气温室效应

生产水泥时排放的大量 CO_2 气体是环境代价最高的“温室气体”。以 CO_2 为主的温室气体导致地球升温，正严重威胁着人类和生物界。由于生产硅酸盐水泥的大量能耗（来自矿物燃料的燃烧）放出大量 CO_2 、 SO_2 、 NO_x ，而石灰石分解产生的 CO_2 数量更大于燃烧生成的 CO_2 ，耗能较高的水泥厂每生产 1t 熟料要排放约 1t CO_2 。近年来，国家大力发展新型干法旋窑水泥生产工艺，生产能耗有所降低，但按照我国的水泥产量与发展速度，保守估计，2001 ~ 2010 年我国大气中由于水泥应用导致 CO_2 增加大约 100 亿 t 之多，对环境影响之大无法估量。

（3）对山河环境的破坏

混凝土体积的 70% ~ 80% 以砂石为骨料。为取得这些原材料，需要开山和挖取河床，破坏自然景观，改变河床位置和形状，造成水土流失或河床改造等严重后果。混凝土浇筑使用的模板还有相当大部分采用木模板，消耗大量的森林资源，造成热带雨林的破坏，间接地影响野生动物的生息环境和生态平衡。在混凝土的运输与施工过程中，除了要消耗大量的能量之外，还产生振动和噪声，是城市公害的主要来源之一。建筑物的施工过程中还产生大量的垃圾、废物，造成环境污染。

（4）能源的消耗

水泥生产要消耗大量的能源。目前，我国每生产 1t 水泥熟料平均消耗 152kg 标准煤，而世界先进水平为 105kg。如果将熟料产量减少 1 亿 t，将节约 1520 万 t 标准煤，其效果相当显著；若通过提高节能技术，使单位煤耗量达到世界先进水平，按照年产 5 亿 t 熟料计，将节约标准煤 2350 万 t，效果同样非常显著。由此可见，水泥混凝土行业要实现可持续发展，一方面是减少水泥熟料的应用，另外应提高节能技术，节约资源和能源。

（5）对生活环境影响

我国混凝土产量巨大，但预拌混凝土所占比例太少。目前发达国家商品混凝土产量已占全部混凝土用量的 80% 以上。其中，法国占 88%，美国占 84%，

日本占 80%，而 2006 年我国预拌混凝土占现浇混凝土比重还不到 30%。上海、北京、广州等城市预拌混凝土已达到混凝土总量的 60% ~ 80%，但全国发展不平衡，个别省份预拌混凝土的比例还不足 10%。施工现场搅拌混凝土的搅拌设备普遍比较落后，不但难以保障混凝土质量，使混凝土结构耐久性较差，而且污染环境，制造噪声，影响居住生活环境。

2 绿色高性能混凝土 (GHPC)

与水泥混凝土相关的资源、能源与环境问题已经十分突出。为使混凝土业能够可持续地发展，Mehta 提出了 3 个基本原则：节约利用混凝土的原材料，大幅度提高混凝土结构的耐久性，以及在混凝土技术的研究中将还原论方法转换为整体论方法。我国混凝土科学技术的先驱与奠基人吴中伟院士综合各种观点，提出了绿色高性能混凝土 (GHPC, green high performance concrete) 的概念。它是指从生产制造使用到废弃的整个周期中，最大限度地减少资源和能源的消耗，最有效地保护环境，是可以进行清洁生产和使用的，并且可再回收循环利用的高质量高性能的绿色建筑材料。绿色高性能混凝土的主要特征是：更多地掺加以工业废渣为主的掺合料，以节约水泥熟料；更大地发挥混凝土的高性能优势，提高耐久性，延长建筑物的使用寿命，以减少水泥和混凝土的用量；大力发展掺工业废渣的绿色高性能混凝土，使混凝土这种最大宗人造材料真正成为可持续发展的材料，将会极大地减少矿物资源、能源的消耗及环境负荷。

绿色高性能混凝土包涵两层含义：“绿色”和“高性能”。“绿色”是对产品“健康、环保、安全”等属性的评价，包括对原材料的利用、生产过程、施工过程、使用过程、废物处置过程等的分项评价和综合评价。“绿色”可概括为节约资源、能源；不破坏环境，更应有利于环境；可持续发展，既满足当代人的需要，又不危害后代人的需求能力，在服役期间应能降低建筑的能耗。“高性能”应具有下列某些或多项优良性能：

(1) 优良的施工性，能在正常施工条件下保证混凝土结构的密实性和均匀性，并尽量降低振动噪声和密实能耗；

(2) 强度高，尽量减少肥梁胖柱，并要考虑到建筑的美学效果和结构挠度以及功能等方面的要求；

(3) 高耐久性，在一般环境或存在腐蚀性介质的环境中，混凝土具有良好的耐久性能；

(4) 具有某些特殊功能，如超早强、低脆性、高耐磨性、吸声、自呼吸



性等。

综合“绿色”和“高性能”这两层含义可以得出：绿色高性能混凝土是指采用先进的现代化混凝土技术，在妥善的质量管理条件下，尽量少占用天然资源和能源，大量使用工业废弃物和城市垃圾制成的具有优良耐久性、工作性和经济适用性的混凝土。绿色高性能混凝土一般应具有以下特征：

(1) 最大限度地减少水泥熟料用量，代之以工业废渣为主的矿物掺合料，从而减少水泥生产过程中的 CO_2 、 SO_2 及 NO_x 等气体的排放量，降低对天然资源与能源的消耗。

(2) 更多地采用废渣，如磨细矿渣粉、粉煤灰、磷渣粉、钢渣粉、硅灰、天然火山灰和稻壳灰等作为活性掺合料以节约水泥，并在改善混凝土耐久性的同时保护环境。

(3) 采用先进生产工艺，对大量建筑垃圾进行资源化处理，使之成为可利用的再生混凝土骨料，减少对天然砂石的开采。

(4) 最大限度地发挥高性能混凝土的优势，减少结构面积或结构体积，节省混凝土用量，减轻自重。通过大幅度提高混凝土耐久性，延长结构的使用寿命，使材料和工程充分发挥其功能。

(5) 扩大绿色高性能混凝土的使用范围。

绿色高性能混凝土不但具有比普通混凝土更加优良的性能，还由于其利用工业废弃物和建筑垃圾，因而能最大限度地节约天然资源和能源，具有保护环境的效益。

3 绿色高性能混凝土（GHPC）研究现状

高性能混凝土是由美国国家标准与技术研究所（NIST）与美国混凝土协会（ACI）于1990年在美国马里兰州召开的讨论会上提出的：高性能混凝土是有所要求性能和均质性的混凝土，必须采用严格的施工工艺、优质材料配制，便于施工，不离析，力学性能稳定，早期强度高，具有较好韧性和体积稳定性等性能的耐久混凝土，特别适用于高层建筑、桥梁以及暴露在严酷环境中的建筑结构。高性能混凝土改变了人们一直将注意力集中在不断提高混凝土强度上面的观念，强调了混凝土建筑应具备优越耐久性，以满足建筑物长期使用的需求。

目前，人们对“高性能”混凝土的认识还不统一，吴中伟院士的定义是：高性能混凝土是一种新型高技术混凝土，是在大幅度提高常规混凝土性能的基础上，采用现代混凝土技术及优质原料，在妥善的质量管理条件下制成；除水



泥、水、骨料以外，必须采用低水胶比，掺加足够的细掺料和高效外加剂；同时应保证其耐久性、工作性、各种力学性能、适用性、体积稳定性与经济合理性。

反映混凝土最基本的性能指标是混凝土强度等级，目前为止，各国规范中规定采用的混凝土最高强度等级分别是：欧洲规范 Euro code 2 为 C105；德国规范 DIN 1045 是 C115；美国规范 ACI 318 没有规定，设计手册用到 C100，研究工作已经达到 C160。一般来讲，在同等结构体系中，混凝土强度等级越高，采用结构构件体积就越小，其用料就越少，为此，各个国家都将混凝土强度等级的研究作为一项基础战略科研进行，特别是美国，一些具有优异性能的高强度等级混凝土用于海洋工程、超高层建筑、大型公共建筑，它带来的不仅仅是强度的提高，更重要的是降低钢材、水泥的消耗量。国外技术先进的搅拌站普遍可配制 C80 ~ C100 混凝土，而我国混凝土搅拌站的混凝土强度等级主要仍旧为 C20 ~ C40。近年来，随着国内超高层建筑的增多，技术先进的搅拌站可以配制 C60 强度等级的混凝土，对于 C80 ~ C100 强度等级范围的混凝土却还在研究和试用过程中。

在高强混凝土技术发展过程中，由于水泥细度在提高，混凝土中胶凝材料用量在加大，外加剂的广泛应用和水胶比显著减小，在这些因素的影响下，混凝土在提高强度的同时，也使体积稳定性、裂缝、脆性和耐火性等问题凸显出来，严重影响了混凝土的耐久性和安全性。西方发达国家由于原材料质量高，性能稳定，施工控制水平高，对混凝土裂缝的控制水平总体上比我国要高许多。但国内外都有共识：单纯高强并非高性能，高耐久性和安全性才能满足结构物使用寿命增长的需求，因此，高性能混凝土技术应该向高工作性、高体积稳定性、高强和高耐久性的方向均衡发展。由此产生了许多先进技术，如掺加合成纤维技术、复合掺合料技术、减缩外加剂技术、按照耐久性设计的配合比技术、耐久性测试和评价技术等。

在废水处理回用技术方面，西方发达国家非常重视，在标准中制定了详细的条款和技术指标，搅拌站废水回用率和技术水平较高。我国在混凝土拌合用水标准中虽有体现，但无专门细则，这对水资源特别是可饮用水日益紧缺的今天是一个急迫解决的问题。

在工业废料的应用方面，西方发达国家总体上领先我国，尤其是生态建材的开发达到较高水平，工业废渣利用率达到 90% ~ 100%，矿渣粉取代水泥材料达 50% ~ 60%，甚至达到 70% 以上，粉煤灰取代水泥材料达 30% ~ 40%，甚至达 60%；我国与发达国家尚有差距，粉煤灰掺量相对较为保守，尤其是在道路和桥梁等工程中尚限制使用；磨细矿渣粉在绿色高性能混凝土中的研究

和应用也十分有限。近年来,复合掺合料技术大大发展,粉煤灰、低品质粉煤灰和其他磨细废渣等处理后综合利用,产生叠加效应复合技术的发展,为工业废料在混凝土中的应用,也为绿色高性能混凝土的发展提供了极为广阔的前景。

随着我国城镇化进程和旧城区改造,产生了大量的建筑垃圾。采用合理的技术手段,可以将旧建筑物或结构物解体的混凝土破碎分级成为粗、细骨料,代替混凝土中部分砂石配制再生骨料混凝土。国家标准《混凝土和砂浆用再生细骨料》(GB/T 25176—2010)、《混凝土用再生粗骨料》(GB/T 25177—2010)和《再生骨料应用技术规程》(JGJ/T 240—2011)也已经发布,这为再生骨料混凝土的生产应用提供了技术标准依据。利用再生骨料配制再生混凝土已被看作为发展绿色混凝土的主要方向之一。

生态混凝土是近年来为解决环境与生态问题而发展出来的一类特殊混凝土,是通过材料研选、采用特殊工艺、制造出来的具有特殊的结构与表面特性的混凝土,能减少环境负荷,并能与生态环境相协调,从而为环保做出贡献。生态混凝土主要包括透水性混凝土、绿化混凝土、吸音混凝土、海洋及水域生物适应型混凝土等,可以应用于水利和交通护坡工程、水污染治理、国防工程等。生态混凝土将混凝土对环境造成的负荷控制在最小限度内,并对生态环境起到相应的协调和改善作用,是新型混凝土材料的发展方向。

4 存在问题及发展趋势

4.1 存在的问题

高性能混凝土在国内经过 10 多年的研究和应用,在技术上已经取得了长足的进步,但由于当前的高性能混凝土具有水胶比低、胶凝材料用量大、粗骨料用量较少、粉体含量多、掺加了各种类型外加剂等特点,使得目前的高性能混凝土“性能并不高”,尚存在收缩大、早期易开裂、脆性大、耐火性差等缺陷。同时由于缺乏配套的设计、试验、施工和应用标准规范,致使高性能混凝土的推广应用受到了一定限制。

现在的高性能混凝土掺入了一定数量的活性矿物掺合料,如磨细矿渣粉、Ⅰ级粉煤灰、Ⅱ级粉煤灰、硅粉等。由于不同工业废渣的地域分布、利用水平和应用技术存在较大的差距,矿物掺合料的使用大多是从造价或成本角度出发,而不是从功能角度出发。同时国内关于工业废渣利用的标准规范对其品质参数提出了较高的要求,排斥不符合标准规范要求的所谓低品质掺合料,如Ⅲ

级粉煤灰或等外灰,造成了一些地区的优质掺合料已经逐渐出现短缺现象,而所谓的低品质掺合料却堆积如山,不仅占用土地,而且污染环境。掺合料应用方式若照此发展,废渣资源的短缺将可能制约高性能混凝土的推广。比如火电厂,根据市场的需要,均采用分级设备对原状粉煤灰进行风选分离出Ⅰ级或Ⅱ级粉煤灰,尚有约40%淘汰的粗灰无法投入应用,只能堆放在堆场。解决上述问题的出路就是发展绿色高性能混凝土,因为绿色高性能混凝土能够充分和有效地利用废渣资源,保护环境,减少混凝土带来的负面影响,从而使混凝土成为可持续发展的建筑材料。

绿色高性能混凝土符合国家环境保护、节能减排、可持续发展的战略,需要进行深入系统研究并大规模推广应用。关于GHPC的研究和应用尚存在以下不足,需要系统、深入研究:

- (1) 将绿色混凝土和高性能混凝土作为整体缺乏系统全面的研究;
- (2) 随着混凝土强度等级提高,混凝土脆性也提高,需要重点关注高强混凝土脆性及改善措施,尤其是关于机制砂高强混凝土脆性的研究;
- (3) 绿色高性能混凝土成套技术缺乏在工程上的系统应用;
- (4) 低品质掺合料(如Ⅲ级粉煤灰、低品质磷渣等)的应用技术,尤其是低品质复合掺合料应用技术;
- (5) 混凝土收缩开裂标准化试验及评价方法研究;
- (6) 荷载作用下混凝土耐久性,尤其是荷载作用下耐久性在线测试研究;
- (7) GHPC及高性能混凝土成套技术在国家标准规范中的体现及推广应用。

在以上问题中,作者认为亟待解决的问题包括以下几类:

- ①绿色高性能混凝土的配制技术;
- ②低品质掺合料和工业废渣在绿色高性能混凝土中的应用技术;
- ③绿色高性能混凝土的耐久性能;
- ④绿色高性能混凝土的应用技术、质量控制方法以及验收标准的制定等。

4.2 发展趋势

高性能混凝土在国内外的总体发展趋势是:高工作性能、高体积稳定性、高力学性能、高耐久性和安全性,掺用复合掺合料,使用无毒的提高特定性能的外加剂,充分、合理和有效利用工业废渣,节约水泥用量和水资源,保护人体健康和生态环境。绿色高性能混凝土的研究方向主要包括以下几点:

- (1) 发展高性能外加剂;
- (2) 注意混凝土拌合物的早期抗裂性能和早期收缩,体积稳定性;