



超高性能 水泥基复合材料

ULTRA-HIGH PERFORMANCE
CEMENTITIOUS COMPOSITES

张云升 张文华 刘建忠 著



科学出版社

超高性能水泥基复合材料

张云升 张文华 刘建忠 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书重点阐述超高性能水泥基复合材料微观结构形成机理、组成设计理论、制备技术及静动态力学性能等。本书共九章,主要内容包括概述,超高性能水泥基复合材料的微结构与机理、设计与制备、物理力学性能、变形性能、动态冲击性能、抗侵蚀性能、抗爆炸性能研究和工程应用等。

本书可供从事土木建筑工程、市政、桥梁、港口水运工程、公路与铁道工程等研究的科技人员及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

超高性能水泥基复合材料/张云升,张文华,刘建忠著. —北京:科学出版社,2014

ISBN 978-7-03-039865-9

I. ①超… II. ①张… ②张… ③刘… III. ①水泥基复合材料-研究 IV. ①TB333

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 036335 号

责任编辑:童安齐 / 责任校对:刘玉靖

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年3月第一版 开本:B5(720×1000)

2014年3月第一次印刷 印张:16 1/4

字数:306 000

定价:70.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026(BA08)

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303



序 言

水泥混凝土是世界上用量最大的人造建筑材料,2012 年我国水泥产量高达 21.8 亿吨,混凝土产量超过 100 亿吨,约占全球的 60%。随着混凝土科学技术的不断发展,先后经历了普通混凝土、高强混凝土、高性能混凝土等阶段,目前已逐步发展到超高性能混凝土阶段。超高性能水泥基复合材料是一种通过高性能外加剂和多元矿物掺和料复合技术,在极低水胶比条件下制成的新型建筑材料,具有超高强(抗压强度 $\geq 150\text{MPa}$)、高韧、高抗暴、高抗渗、高耐腐蚀等特性,在国防、核电、海洋平台、超高层建筑、超大跨径桥梁等大型土木工程中具有广阔的应用前景。

张云升教授与他的研究生,通过“超高性能水泥基抗侵蚀防护工程材料的制备理论及其动态效应研究”等多个国家和省部级项目的研究,揭示出超低水胶比下多组分胶凝浆体水化及微结构形成机理,提出了超高性能水泥基复合材料的设计理论与制备技术,建立了强动载条件下超高性能水泥基复合材料的本构关系及破坏准则,并取得了一系列国家发明专利和大量科技论文成果,形成了系统的超高性能水泥基复合材料理论和技术体系。考虑到目前国内外尚未见系统进行超高性能水泥基复合材料研究的书籍,为了便于在工程中推广和应用这种新型超高性能水泥基复合材料,作者总结了他们近 10 年来的研究成果,系统介绍了超高性能水泥基复合材料微结构形成机理、组成设计理论、制备技术、静动态力学性能以及工程应用。

本文涉及的内容丰富,学术价值和实用价值较高,对于促进超高性能水泥基复合材料的基础研究与工程应用具有重要的参考价值。在此书出版之际,我愿为之作序,并表示祝贺。

中国工程院院士

孙伟

前 言

随着我国经济的快速发展、城市化进程的不断推进,现代建筑物呈现出向超高层、超大跨发展趋势,混凝土在满足高耐久性要求的同时,对其强度的要求也越来越高。另外,目前的国防防护工程材料多为普通强度(C30~C50)等级的混凝土或者普通纤维增强混凝土,抗爆炸侵略能力较弱,无法满足现代化战争的需求。同时,一些民用设施在使用过程中也经常遭遇动态冲击荷载,如海浪对海岸及海洋平台的冲击、地震荷载对高层建筑的作用、飞机起飞和降落时对跑道的冲击作用等,这些工程同样需要具有高强、高韧性的建筑材料。

超高性能水泥基复合材料(Ultra-high Performance Cementitious Composites, UHPCC)是一种以硅酸盐水泥和多种工业废渣为胶凝体系、以高强粗集料和纤维为增强项,在极低水胶比条件下采用常规工艺制备的抗压强度大于150MPa,同时具有良好流动性能、较好体积稳定性和优异耐久性能的新型水泥基复合材料。该新型材料具备活性粉末混凝土(Reactive Powder Concrete, RPC)超高力学性能之优点,同时克服了其收缩大、成本高、能耗大、制备工艺复杂、不易于在实际工程中应用等不足。因此,超高性能水泥基复合材料在现代国防防护工程以及超高层、超大跨和一些长期受到动载荷的建筑中具有广泛的应用前景,对其研究具有十分重要的意义。

本书是我们近10年研究工作和研究成果的总结,从材料科学原理出发,以组成、结构与性能的关系为主线,通过试验研究和理论分析相结合的方法,系统研究了超高性能水泥基复合材料的微结构形成机理、组成设计与优化理论、合成与制备技术、静动态力学性能、收缩变形行为、强动载条件下力学响应以及工程应用。建立了超高性能水泥基复合材料微结构形成机理模型;提出了低水胶比和大掺量多元复合矿物掺合料体系的界面强化理论及高强密实骨架设计原理,突破了国际上对超高性能混凝土不能使用粗集料的限制;发展和完善了纤维增强增韧理论,有效提高了混凝土材料的抗动载能力;形成了超高性能水泥基

材料的组成设计理论及制备体系;同时建立了强动载条件下超高性能水泥基复合材料的本构关系及破坏准则。该课题的研究取得了一系列国家发明专利和大量科技论文的成果,已形成了较为系统的超高性能水泥基复合材料理论和技术体系,其对于推动超高性能水泥基复合材料的基础研究及工程应用具有积极意义。全书共分为九章:

第一章概述,是对全书的铺垫。首先阐述了当今混凝土领域所面临的问题及挑战,然后对超高性能水泥基复合材料进行了定义并对其研究现状进行分析,并在此基础上提出了本书的研究框架。

第二章超高性能水泥基复合材料的微观结构与机理。通过自行研制开发的新型仪器,原位、持续追踪观测了该材料在多种条件下的微结构形成过程及机理,基于充实的试验数据,提出了其微结构形成机理模型。

第三章超高性能水泥基材料的设计与制备。利用多元复合矿物掺合料技术及高强密实骨架设计原理,结合纤维增强增韧理论,建立了超高性能水泥基材料的组成设计理论及制备体系。

第四章超高性能水泥基复合材料的物理力学性能。系统介绍了超高性能水泥基复合材料在刚拌合成型后的流变性能,以及硬化后包括抗压、抗折和轴心抗拉等准静态力学性能。

第五章超高性能水泥基复合材料的变形性能。通过自行设计的测试装置,系统研究了超高性能水泥基复合材料早期和长期的自收缩性能及其干燥收缩的性能。

第六章超高性能水泥基复合材料动态冲击性能。通过落锤及霍普金森压杆等试验方法,系统研究了超高性能水泥基复合材料在冲击压缩、冲击拉伸荷载下的性能。

第七章超高性能水泥基复合材料抗侵彻性能。介绍了超高性能水泥基复合材料在抵抗新型弹体侵彻的性能,揭示了材料的性能参数对侵彻规律的影响,并建立了与靶体材料密切相关的侵彻模型。

第八章超高性能水泥基复合材料抗爆炸性能研究。介绍了超高性能水泥基复合材料在一次及多次爆炸荷载作用下的靶体响应,并利用非线性有限元对爆炸这种微秒级的瞬态过程进行了模拟分析。

第九章工程应用。介绍了超高性能水泥基复合材料在一些典型工程中的应用。

全书的主要研究和撰写工作由张云升、张文华和刘建忠负责完成,参加研究工作的还有解放军理工大学方秦教授、龚自明博士,东南大学戎志丹博士、硕士生余伟和张国荣,在此表示衷心的感谢。另外,还要感谢国家自然科学基金委员会等机构和单位对课题研究的大力资助。

由于超高性能水泥基复合材料的组分复杂,且发展历史较短,目前还有许多问题需要进一步解决和完善;同时由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,恳切读者批评指正。

目 录

序言

前言

第一章 概论	1
1.1 引言	1
1.2 超高性能水泥基复合材料的发展简史	2
1.2.1 普通混凝土	2
1.2.2 高强混凝土	2
1.2.3 超高强混凝土	3
1.2.4 高性能混凝土	3
1.2.5 活性粉末混凝土	4
1.3 超高性能水泥基复合材料的定义	5
1.4 超高性能水泥基复合材料的现状	6
1.4.1 水化硬化及微结构形成过程	6
1.4.2 静态力学性能	9
1.4.3 动态力学性能	10
1.4.4 抗侵蚀性能	15
1.4.5 抗爆炸与震塌性能	16
参考文献	17
第二章 超高性能水泥基复合材料的微观结构与机理	27
2.1 引言	27
2.2 理论基础	27
2.2.1 硅酸盐水泥的水化反应	27
2.2.2 硅酸盐水泥的水化过程	28
2.2.3 硅酸盐水泥的微结构形成过程	29
2.3 凝结硬化过程的超声波追踪	29
2.3.1 超声波测量仪	29
2.3.2 试验研究	31
2.3.3 试验结果与分析	32
2.4 结构形成过程的电阻率动态监测	43
2.4.1 高温无电极电阻率测量仪	43

2.4.2 试验结果与分析	45
2.5 水化放热过程的连续观测	53
2.5.1 等温量热仪	53
2.5.2 试验结果与分析	54
2.6 结构形成机理	57
参考文献	59
第三章 超高性能水泥基复合材料的设计与制备	61
3.1 引言	61
3.2 理论基础	61
3.2.1 多元复合胶凝体系	61
3.2.2 界面过渡区	64
3.2.3 增强相	64
3.3 组成设计	65
3.4 制备技术	66
参考文献	68
第四章 超高性能水泥基复合材料的物理力学性能	69
4.1 引言	69
4.2 流变性能	69
4.2.1 混凝土流变学	69
4.2.2 试验方法	70
4.2.3 结果与分析	73
4.3 力学性能	88
4.3.1 抗压强度	88
4.3.2 抗折强度	96
4.3.3 轴心抗拉强度	100
参考文献	105
第五章 超高性能水泥基复合材料的变形性能	106
5.1 引言	106
5.2 超高性能水泥基复合材料自收缩	106
5.2.1 早期自收缩特性	106
5.2.2 试验研究	108
5.2.3 结果与分析	108
5.2.4 长期自收缩特性	112
5.2.5 超高性能水泥基复合材料自收缩特性机理研究	118
5.3 超高性能水泥基复合材料干燥收缩	125

5.3.1 试验研究	125
5.3.2 结果与分析	126
参考文献	132
第六章 超高性能水泥基复合材料动态冲击性能	133
6.1 引言	133
6.2 试验技术	133
6.2.1 落锤试验装置	133
6.2.2 撞磨试验装置	134
6.2.3 冲击压缩试验装置	135
6.2.4 冲击拉伸试验装置	139
6.3 落锤试验	144
6.3.1 冲击破坏形貌	144
6.3.2 掺加方式的影响	145
6.3.3 纤维掺量的影响	146
6.4 耐撞磨性能	147
6.4.1 宏观破坏形态	147
6.4.2 掺加方式对耐撞磨性能的影响	148
6.4.3 纤维掺量对耐撞磨性能的影响	149
6.4.4 抗冲击性能与耐撞磨性能的关系	150
6.5 冲击压缩性能	152
6.5.1 单次冲击压缩性能研究	152
6.5.2 多次冲击压缩性能研究	161
6.6 冲击拉伸试验	166
6.6.1 单次冲击拉伸性能研究	166
6.6.2 多次冲击拉伸性能研究	172
6.6.3 冲击拉伸应变率效应	173
参考文献	174
第七章 超高性能水泥基复合材料抗侵彻性能	176
7.1 引言	176
7.2 试验原理	176
7.2.1 弹体侵彻深度影响因素	176
7.2.2 量纲分析及相似理论	177
7.3 实弹试验	179
7.3.1 配合比设计	179
7.3.2 靶体设计	179

7.3.3 靶体制作	180
7.3.4 试验装置	181
7.4 试验结果及分析	182
7.4.1 靶体破坏过程	182
7.4.2 侵彻试验结果	183
7.4.3 结果分析	184
7.5 弹丸侵彻模型	191
7.5.1 模型的建立	192
7.5.2 模型的验证	192
7.6 弹丸侵彻数值模拟	193
7.6.1 模型建立	193
7.6.2 模拟结果及分析	196
参考文献	207
第八章 超高性能水泥基复合材料抗爆炸性能研究	208
8.1 引言	208
8.2 试验	208
8.2.1 试验设计	208
8.2.2 试验过程	208
8.3 试验结果及分析	210
8.3.1 爆炸试验结果	210
8.3.2 靶体压缩系数	210
8.3.3 迎爆面破坏情况	213
8.3.4 背爆面破坏情况	215
8.4 超高性能水泥基复合材料二次爆炸试验	217
8.5 爆炸试验数值模拟	218
8.5.1 算法与模型	218
8.5.2 模拟结果及分析	223
参考文献	233
第九章 工程应用	234
9.1 高层建筑	234
9.1.1 北京财税大楼	234
9.1.2 国家大剧院	234
9.1.3 沈阳远吉大厦	235
9.1.4 广州西塔	235
9.1.5 京基 100	236

9.1.6 美国西雅图双联广场大厦	237
9.1.7 马来西亚吉隆坡双塔石油大厦	238
9.2 桥梁工程	239
9.2.1 加拿大 Sherbrooke 步行/自行车桥	239
9.2.2 美国 Mars Hill 桥	240
9.2.3 韩国和平桥	240
9.2.4 迁曹铁路漆柏干渠大桥	240
9.3 其他工程	241
9.3.1 沈阳西科硅有限公司工业厂房扩建工程	241
9.3.2 南京轨道交通工程	242
9.3.3 高铁人行道盖板、电缆槽盖板	242
参考文献	243

第一章 概 论

1.1 引 言

随着我国经济的迅猛增长,基础工程建设规模空前、城市化进程快速推进,摩天大楼拔地而起、雄伟大堤斩江断河、隧道涵洞深入海底,各种大型基础建设正如火如荼地进行。混凝土由于其取材方便、制备简单、易于成型、力学性能稳定等优点,被广泛应用于市政、桥梁、道路、水利、地下、海洋以及军事防护等工程,在我国城市化进程建设中发挥着无可替代的重要作用。据中国建筑材料联合会统计报告,2010 年我国混凝土用量达 30 亿 m^3 [1]。混凝土的大量使用带动水泥产业的迅猛发展,2000 年以来我国的水泥产量逐年递增,2010 年产量达到 18.4 亿 t,2012 年达到 21.8 亿 t。然而,众所周知,水泥的生产除了消耗大量不可再生资源石灰石、黏土外,同时还排放大量“温室效应”气体二氧化碳,生产 1t 水泥将产生 1t 二氧化碳,水泥生产给人类赖以生存的环境带来巨大压力。按照我国在哥本哈根气候变化大会召开之前的承诺,到 2020 年我国单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 40%~50%。显而易见,大幅度减少水泥用量是实现这一承诺必须采取的措施。因此,如何在必须大幅度地减少水泥用量的前提下,还能保障我国基础工程建设对混凝土巨大用量的需求,是当今混凝土科学界的重大难题。

我国大规模的基础工程建设为水泥基复合材料的发展迎来了重大机遇,同时也带来了挑战。一方面,重大基础工程关系到国计民生,设计寿命几十年甚至上百年,然而混凝土结构过早失效的事实时有发生,不仅造成了重大的经济损失,而且导致了人员的大量伤亡。因此,实现水泥基复合材料的高性能化,增强工程结构的抗灾变能力,延长混凝土结构的使用寿命,是国家的重大需求。另一方面,随着我国大规模工程建设的不断推进,超长、超高层、超大跨径、超大体积等新型混凝土结构也不断出现,对水泥基复合材料的性能和功能提出了新的、更高的要求。

另外,国际形势正在发生新的深刻复杂变化,我国将面临着更多元化和复杂化的安全挑战[2]。目前,国际军事竞争依然激烈,主要国家加紧调整安全和军事战略,加快军事改革步伐,大力发展军事高新技术,武器装备日新月异,涌现出了大量高精度制导和高毁伤的武器。如美国的 GPS/INS 制导武器装置可以不受气候条件的影响,而且精度可以提高到 3m 左右,大大提高了打击能力[3]; B61-11 钻地核炸弹,可钻土 50 多米,钻岩石 3~6m,爆炸当量 300~300 000t,是同当量触地核爆

炸破坏效应的几倍至几十倍; GBU-28 等常规制导炸弹, 可钻土 30m 以上, 钻混凝土 6m 左右^[4-6]。显然, 在未来高技术战争中, 这些精确制导、高毁伤的高技术武器将成为主要打击手段, 现有防护工程将面临严峻考验^[3-5]。就防护工程结构本身来说, 通过几十年的努力, 我军已形成一定数量且能抵御多种武器打击的防护工程。但早期建设的部分防护工程, 由于当时经济条件和技术水平所限, 已经很难满足现代战争发展的需要^[6]。因此, 面对当今风云变幻的世界局势, 研制高强、高韧、高抗力的新型防护工程材料, 有效防御外敌入侵、维护国家安全和领地完整, 迫在眉睫。

综上所述, 研发一种低水泥用量、同时具备良好工作性能、较高力学性能、优异耐久性能的绿色生态环保建筑材料, 既能充分满足我国目前快速城市化进程中大量工程建设的需要, 同时也能解决国家安全防御所面临的技术难题, 具有重要的现实意义。

1.2 超高性能水泥基复合材料的发展简史

随着科学技术的发展, 混凝土技术不断推陈出新, 从配合比设计方法、原材料组分优化、制备技术各方面都在持续创新, 所制备出的混凝土无论是新拌和状态的工作性能, 还是到最终硬化后的力学性能与耐久性能, 其指标参数都在不断地提高。自从 19 世纪 20 年代波特兰水泥问世到目前为止, 混凝土的发展经历可以概括为以下几个阶段。

1.2.1 普通混凝土

自 1842 年 Joseph Aspdin 发明波特兰水泥 (Portland Cement) 后近一个世纪的漫长时间里, 混凝土技术进展比较缓慢。在这一时期里, 混凝土是由最基本的水泥、水、粗集料、细集料四种组分组成, 制备技术只是简单的混合搅拌成型, 硬化后的强度在 20~30MPa, 水灰比 (W/C) 是混凝土强度的决定因素。1930 年, 瑞士科学家鲍罗米 (Belomey) 根据大量试验数据, 应用数理统计方法, 提出了混凝土强度与水泥实际强度及 W/C 之间的关系, 这一关系也成了普通混凝土配合比设计的理论基础。1934 年, 美国发明了振动器, 在混凝土成型过程中施加振动使其密实均匀, 这是在制备技术方面作出的有益改进, 从此混凝土的强度开始慢慢提高, 并出现强度约为 40MPa 的混凝土^[7]。

1.2.2 高强混凝土

1960 年左右, 德国发明了三聚氰胺高效减水剂; 日本于 1965 年左右发明了萘系高效减水剂。高效减水剂的出现克服了混凝土因拌料干硬而难以施工的根本缺陷, 促使混凝土在较低水灰比条件下成型密实而获得高强混凝土。高强混凝土

(High Strength Concrete, HSC)^[7-11]是一种抗压强度大于 50MPa 的混凝土,其组分主要包括水泥、集料、高效减水剂和水。

可以看出,高效减水剂的出现使混凝土技术发生了革命性的变化。高效减水剂的使用在混凝土减少用水量的同时,保持较高流动性。用水量的减少,降低了硬化混凝土的孔隙率和内部缺陷。内部缺陷的减少一方面提高了强度;另一方面,密实度的提高使外部有害介质很难通过孔隙进入到混凝土内部,极大地提高了混凝土的耐久性能。因此,高强混凝土在工作性能、强度与抗渗性等方面具有综合的优良性,适应了当代工程结构向大跨、高耸、重载方向发展和承受恶劣环境条件的需要,满足了工业化生产要求,因而迅速在土木工程领域中得到推广应用。

1.2.3 超高强混凝土

到了 20 世纪 80 年代,出现了抗压强度在 100MPa 以上的超高强混凝土(Ultra High Strength Concrete, UHSC),其中比较典型的有无宏观缺陷水泥(Macro Defect Free, MDF)^[12-16]和超细粒聚密水泥(Deified Small Particles, DSP)。MDF 采用 90%以上的高铝水泥,1%~8%水溶性高分子聚合物及适量外加剂,水灰比在 0.1~0.2,经拌和辊压,在 4~10MPa 压力下成型,抗压强度可达 200~300MPa,抗折强度达 150~200MPa,抗拉强度达 140MPa,弹性模量达 50GPa。DSP 材料由 70%~80%水泥、20%~30%平均粒径比水泥小 1~2 个数量级的超细材料、高效减水剂和水组成,应用颗粒学原理,按照紧密堆积理论模型,并通过合理的颗粒堆积使材料达到最紧密堆积状态,颗粒之间通过化学反应结合而得到均匀密实的高密实材料。

与高强混凝土相比,超高强混凝土在原材料组成、制备技术方面都有了较大改进。在配合比设计时采用了最大密实度原理,使微细颗粒之间能紧密堆积;在制备技术中采用了压力成型的方法,进一步提高密实度。上述两个措施都最大限度地减小了混凝土内部的孔隙率,提高了密实度,极大地提高了强度,这对后来混凝土技术的发展提供了很好的借鉴。

1.2.4 高性能混凝土

高性能混凝土(High Performance Concrete, HPC)^[17-20]是混凝土技术继高强混凝土后的又一重大进步。然而,虽然高性能混凝土经过了二十多年的发展,但到目前为止学术界对此还没有统一的定义。美国国家标准与技术研究所(NIST)与美国混凝土协会(ACI)在 1990 年 5 月召开的学术会议上提出:高性能混凝土是具有某些性能要求的匀质混凝土,必须采用严格的施工工艺,采用优质的原材料配制,便于浇捣、不离析,力学性能稳定,早期强度高,具有韧性和体积稳定性等性能的耐久混凝土^[18];此外,1990 年美国的 Metha 提出:高性能混凝土不仅要求高强

度,还应具有高耐久性(抵抗化学腐蚀)等其他重要性能,例如高体积稳定性(高弹性模量、低干缩率、低徐变和低的温度变形)、高抗渗性和高工作性;法国将圆柱体试样抗压强度超过 60MPa,并具有良好工作度和其他优良特性的混凝土称为高性能混凝土^[17];日本将高流态的自密实免振混凝土称之为高性能混凝土。

虽然目前对于高性能混凝土还没有统一的定义,然而从上述定义中可以看出,学者们主要是从工作性能、力学性能和耐久性能这三个方面对高性能混凝土进行界定,这与高强混凝土只强调力学性能的定义相比有显著区别。

高性能混凝土的主要组分包括水泥、集料、水、高效减水剂和矿物掺和料。与高强混凝土相似,高效减水剂的使用减少用水量,从而降低孔隙率、提高密实度,随之提高混凝土的强度、抗渗性、耐久性。此外,对于矿物掺和料如粉煤灰、硅灰等的使用,有以下几个作用:一是改善了混凝土拌和物的和易性、减少泌水、增加流动性,提高了拌和物的质量;二是矿物掺和料的粒径小,能起到很好的填充作用,提高密实度,进而提高耐久性;三是矿物掺和料具有火山灰效应,能与水泥水化产物进行二次水化,强化混凝土内部结构。由此可以看出,高性能混凝土通过高效减水剂和矿物掺和料的同时使用,可实现混凝土性能的多样化要求,无论是工作性能、力学性能还是耐久性能,只要通过科学合理的配合比设计,都能达到较为理想的效果。

1.2.5 活性粉末混凝土

1993年,法国学者 Richard 和 Cheyrezy^[21]采用“高致密水泥基均匀体系(DSP)”模型,集高强混凝土、高性能混凝土和纤维混凝土之优势于一体,研制出了活性粉末混凝土(Reactive Powder Concrete, RPC)^[22-24]。

RPC的主要工艺包括以下几点:一是根据最紧密堆积原理,通过剔除粗骨料,用最大料径为 400~600 μm 石英砂为细骨料,掺加高活性矿物掺和料——硅灰,形成高均匀性和密实度的颗粒体系;二是采用大掺量的高效减水剂,大幅度减少用水量,降低孔隙率;三是掺加微细钢纤维,降低材料的脆性、提高韧性;四是在凝固前和凝固期间加压排气,进一步提高密实度;五是凝固后,通过热压养护,提高化学反应活性和内部结构的密实性^[22-24]。

通过上述方法所制备的 RPC 材料具有超高强度、超高耐久性、高韧性,同时还具备良好的体积稳定性能,其静态抗压强度可达 200MPa,抗折强度可达 50MPa,弹性模量达 50GPa 以上,断裂能达 20 000~40 000J/mm²^[25]。可以看出,活性粉末混凝土材料在力学性能指标上,已达到了一个全新的高度,超越了之前的水泥基复合材料。

活性粉末混凝土无论从配合比设计方法、原材料组成和制备技术都有了长足的进步,从理论上丰富了无机胶凝材料学,同时也为之后的水泥基材料科学研究指

明了新的方向。然而,分析其制备技术可以看出,RPC 在实际推广应用中还存在着以下问题:

(1) 水泥和硅灰的用量大,前者可达 50%,后者可达 25%。水泥和硅灰用量大会出现早期水化放热过大的现象,容易造成构件内外温差过大而产生温度裂缝,进而影响其物理力学性能及耐久性能;再者是在硬化后服役过程中的收缩大,水泥用量越多,收缩会越大^[26]。

(2) 细骨料为粒径 400~600 μm 的石英砂,石英砂的磨细将消耗较多的能量,从而影响其环保性能,此外也提高了材料的造价。

(3) 剔除了粗集料,提高了造价。对于普通混凝土来说,粗集料可占 50%以上,是其中用量最大也是造价最便宜的组分,RPC 剔除粗集料会明显地提高其造价;此外,粗集料是抑制混凝土收缩最主要的成分,剔除粗集料以后,RPC 的收缩变形将明显增大^[26,27]。

(4) 成型过程中需要施加压力,这限制了 RPC 在建筑物现场浇注中使用;

(5) 养护条件要求苛刻,需要高温蒸养,只能在工厂预制,能耗也很高,限制其在实际工程中的应用。

综上所述,RPC 存在着材料造价高、能耗大、制备工艺复杂、不易于在实际工程中应用等不足。若要对 RPC 这种性能优异的水泥基材料在实际工程中大规模推广应用,还需对其进行革新,研发新一代水泥基复合材料。

1.3 超高性能水泥基复合材料的定义

随着混凝土技术的发展,至今为止,已发展出一种不同于 RPC 的新型超高性能水泥基复合材料,但由于其发展时间较短,目前国内外对其还没有统一的名称与定义,现分述如下。

Schmidt 等^[28]称新一代水泥基材料为超高性能钢纤维混凝土,并将之定义为抗压强度 150~250MPa、抗折强度 25~60MPa、弹性模量 50~60GPa 的混凝土。此混凝土具有低水灰比(0.14~0.2),高水泥、硅灰用量,掺加大量高效减水剂,并使用粒径为 150~600 μm 的磨细石英砂作骨料等特点。

Delft 大学 Tuan 等^[29,30]将新一代的混凝土称为超高性能混凝土,并将其定义为抗压强度大于 150MPa、抗折强度大于 20MPa 的混凝土。

重庆大学王冲等^[31,32]利用水泥混凝土现有的技术途径、采用常规原材料和通用工艺,制备出抗压强度大于 150MPa 的混凝土,他们称之为特超强高性能混凝土。

东南大学孙伟院士等^[33-38]提出了生态型活性粉末混凝土的概念,即在 RPC 材料的基础上,在保证其优异性能的同时,掺入大量的工业废渣,最大限度地做到节