

 混凝土技术丛书

纤维增强水泥 与纤维增强混凝土

● 沈荣熹 王璋水 崔玉忠 编著



化学工业出版社

混凝土技术丛书

纤维增强水泥与 纤维增强混凝土

沈荣熹 王璋水 崔玉忠 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书为《混凝土技术丛书》中的一个分册。本书将纤维增强水泥基复合材料,按水泥基体的组成、纤维的作用、制备工艺和复合材料的性能等,分为纤维增强水泥与纤维增强混凝土两大类,在简明地阐述两类复合材料的定义、发展历程、增强机制与力学性能特征的基础上,对各类中主要品种的原材料、配合比、制备工艺、力学性能与耐久性以及应用领域与应用实例等均作了详尽的介绍,其中包含近年来国内外开发的若干新品种与新技术。

本书的信息量大、实用性强,对我国从事纤维增强水泥与纤维增强混凝土的设计、研究、生产、施工与使用的广大工程技术人员和技术工人有重要参考价值,也可作为高等院校与职业技术学校有关专业的参考读物。

图书在版编目(CIP)数据

纤维增强水泥与纤维增强混凝土/沈荣熹,王璋水,崔玉忠编著. —北京:化学工业出版社,2006.7
(混凝土技术丛书)
ISBN 7-5025-9191-5

I. 纤… II. ①沈…②王…③崔… III. ①纤维增强水泥②纤维增强混凝土 IV. ①TU528.58②TU528.572

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第095507号

混凝土技术丛书 纤维增强水泥与纤维增强混凝土

沈荣熹 王璋水 崔玉忠 编著
责任编辑: 奚臻 仇志刚
文字编辑: 咎景岩
责任校对: 蒋宇
封面设计: 于兵

*

化学工业出版社出版发行
(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码 100029)
购书咨询: (010)64982530
(010)64918013
购书传真: (010)64982630
<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销
北京云浩印刷有限责任公司印刷
三河市前程装订厂装订

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 23½ 字数 440 千字
2006年9月第1版 2006年9月北京第1次印刷
ISBN 7-5025-9191-5
定价: 49.00元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

《混凝土技术丛书》编委会

主 任 姚 燕

副主任 韩素芳 王铁梦 陈龙珠 王 玲

委 员 (按姓氏笔画排序)

王 玲 中国建筑材料科学研究院高级工程师, 中国混凝土外加剂协会秘书长, 中国土木工程学会外加剂专业委员会副主任, 中国建筑学会建材分会外加剂应用技术委员会副主任

王铁梦 冶金建筑研究总院原副院长兼上海分院总工程师, 教授级高级工程师, 博士生导师, 国家工业建筑诊断与改造工程技术研究中心技术顾问

王爱勤 北京市建筑材料科学研究院院长助理, 高级工程师

邱 平 中国建筑科学研究院国家建筑工程质量监督检验中心高级工程师

沈荣焘 中国建筑材料科学研究院水泥与新型建筑材料研究所顾问, 教授级高级工程师

张树凯 原国家建材局生产司司长, 中国水泥制品工业协会名誉会长, 高级工程师

张荣成 中国建筑科学研究院国家建筑工程质量监督检验中心教授级高级工程师

陈龙珠 上海交通大学教授, 博士生导师, 安全与防灾工程研究所所长, 建设部桩基动测单位资质评审专家委员会委员

陈拴发 长安大学公路学院教授

岳跃真 中国水利水电科学研究院结构材料所副总工程师, 教授级高级工程师

周德源 同济大学土木工程学院教授, 博士生导师

胡曙光 武汉市副市长, 武汉理工大学教授

姜 红 国家建筑工程质量监督检验中心常务副主任, 中国建筑科学研究院建筑工程检测中心主任, 教授级高级工程师

姚 燕 中国建筑材料科学研究院院长, 教授级高级工程师, 博士生导师, 中国建筑材料工业协会副会长, 中国混凝土外加剂协会会长, 中国水泥制品工业协会副会长, 中国硅酸盐学会水泥分会主任, 中国水泥协会副会长, 中国建筑学会建材分会副主任

崔庆怡 陕西建筑科学研究院顾问, 教授级高级工程师

隋同波 中国建筑材料科学研究院院长助理, 教授级高级工程师, 博士生导师, 中国硅酸盐学会水泥分会秘书长

韩素芳 中国建筑科学研究院教授级高级工程师，中国土木工程学会混凝土质量专业委员会主任委员

韩继云 中国建筑科学研究院国家建筑工程质量监督检验中心研究员，一级注册结构师

出版者的话

混凝土具有强度高、耐久性好、原料来源广、制作工艺简单、成本较低、适用于各种自然环境等优点，因此，它是世界上使用量最大、最为广泛的首选建筑材料。近年来，随着建筑技术的不断更新，混凝土的组成及施工工艺也发生了巨大变化，混凝土结构的研发与创新，新材料、新工艺、新技术的开发应用，典型工程的创新应用等均取得了长足的进步，建造了许多举世瞩目的工程项目。为了及时总结推广和应用混凝土的新技术、新工艺、新材料，总结在混凝土研究开发方面的创新经验，以期进一步促进对混凝土的科学研究和技术发展，我们特邀请了中国建筑材料科学研究院、中国建筑科学研究院、原冶金工业部建筑科学研究所、上海交通大学等有关科研院所和企业的专家、教授编写了《混凝土技术丛书》和《建筑工程质量控制丛书》。

这两套丛书总结和反映了国内外有关混凝土研究、开发、应用的最新技术、最新进展，书中有不少数据与理论是作者长期实践经验的总结，这些资料非常宝贵，有的是第一次公开出版，具有非常重要的参考价值。这两套丛书是从事土木与水利工程的地质勘探、结构设计、施工技术、质量检测和监理等工作的科研人员及工程技术人员自学提高的必备参考书，同时也可作为继续教育的培训用书及相关院校师生的参考书。

我们真诚地欢迎读者和用户对丛书提出宝贵的意见和建议，以便再版时不断使其得到改进和完善。

化学工业出版社

2005年12月

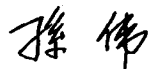
序

纤维增强水泥基复合材料 (fibre reinforced cement-based composite) 在国际上的发展已跨越了将近一个世纪。自 20 世纪初 Ludwig Hatschek 将石棉纤维掺入水泥净浆中制成高强薄壁的制品, 直至今今钢纤维与合成纤维在混凝土工程中的使用, 该复合材料被推向日益广阔的应用领域, 其主要标志是新品种的相继问世、新技术的不断发展以及材质的高性能化。

纤维增强水泥基复合材料按所用纤维的品种、性能与取向, 基体的组成与特性以及所采用的制备工艺等的不同, 基本上可分为两个系列, 即纤维增强水泥系列 (fibre reinforced cement system) 与纤维增强混凝土系列 (fibre reinforced concrete system)。前者以掺量较高的短纤维或适量的连续长纤维作为主要增强体 (primary reinforcement), 采用专门的工艺与装备使纤维按二维乱向或二维定向配置于水泥净浆或砂浆中, 制成具有较高抗拉、抗弯与抗冲击强度的薄壁制品。后者则以掺量较低的短纤维作为次要增强体 (secondary reinforcement), 采用通常的混凝土浇筑或喷射工艺使纤维按三维或二维乱向均匀分布于混凝土中, 纤维在其中主要起着减少塑性收缩裂缝、延缓裂缝扩展并相应地增进混凝土裂后承载能力与韧性的作用。但值得注意的是, 国际上不少文献或报道对纤维增强水泥基复合材料的上述两个系列往往不加区分, 因而易引起误导。例如, 由于对纤维在不同系列的复合材料中所起的作用认识不清, 再加上某些纤维供应商不切实际的宣传, 使有些人误认为在混凝土中掺加少量的合成纤维即有助于提高混凝土的抗压、抗拉与抗弯强度。又如, SIFCON (slurry infiltrated fibre concrete) 的钢纤维掺量显著高于通常的钢纤维混凝土 (SFRC), 并用水泥净浆或砂浆作基体, 其成型工艺完全不同于 SFRC, 并且其抗压、抗拉、抗弯、抗剪与抗冲击强度以及韧性等均较 SFRC 有大幅度的提高, 理应将其归入纤维增强水泥系列, 但在不少西方国家将其归入纤维增强混凝土系列, 作为高性能纤维增强混凝土 (HP-fibre reinforced concrete) 的一个主要品种。《纤维增强水泥与纤维增强混凝土》一书的作者对上述两个系列的水泥基复合材料不仅在定义上加以明确的区分, 同时也相应地体现在品种归类与分篇阐述等方面, 使读者阅后获得非常清晰的概念, 这无疑此书的一大特色。此外, 本书还具有系统性好、实用性强与信息量大等特色。

此书的第一作者沈荣熹教授从事纤维增强水泥基复合材料的理论研究与技术开发达四十多年, 他是一位国内外著名的资深专家, 在 1986~1996 年曾先后受

聘为国际刊物“Cement Composites & Lightweight Concrete”与“Cement & Concrete Composites”的编委，曾多次在国内外与国际同行们进行技术交流与研讨，取得多项高水平的科技成果，发表过大量的学术论著，他为我国纤维增强水泥基复合材料的发展作出了重大贡献。第二作者王璋水高级工程师从 20 世纪 70 年代中期起即从事钢纤维增强混凝土及后来的合成纤维增强混凝土的研发工作，主持过多项纤维混凝土的研究课题和工程的设计及现场施工指导，具有丰富的专业知识和实践经验；参与编制多项有关纤维混凝土的规程与标准，是我国纤维混凝土的资深专家。第三作者崔玉忠教授级高级工程师在中国建筑材料科学研究院长期从事玻璃纤维增强水泥（GRC）等多种新型纤维增强水泥的研究，为这些新品种的开发与推广做了大量卓有成效的工作。由于这三位作者的密切配合、通力合作，并特邀叶启汉和邓宗才两位教授参与了部分章节的撰写，使此书不仅内容充实、新颖，还具有很高的实用性与指导性。全书的文字简练、深入浅出、图文并茂，不仅对从事纤维增强水泥基复合材料的科研、设计、教学与管理人员等有参考价值，也适合于有一定文化程度的生产与施工工人阅读。我深信此书的出版将有助于我国纤维增强水泥基复合材料的进一步发展。



中国工程院 院士
东南大学 教授

前 言

水泥基材料至今仍是全世界用量最大、应用最广泛的建筑材料。全世界水泥年产量和混凝土年耗量已分别达到 22 亿吨以上和超过 55 亿立方米。水泥基材料的主要缺点是抗拉强度低、脆性大和易开裂。为克服水泥基材料的上述缺点，提高其耐久性，国际材料科学工作者与工程界曾开展了半个多世纪的探索与研究。国际上现已一致公认，在水泥基材料中掺加纤维有助于其克服缺点、改善性能并进一步扩大应用领域。由此开发了一系列纤维增强水泥基复合材料。

纤维增强水泥基复合材料基本上可分为两大类：一类是“纤维增强水泥”，纤维在其中起着主要增强材的作用，用以制作高强、薄壁的水泥制品。另一类是“纤维增强混凝土”，纤维在其中起着次要增强材的作用，主要用于现浇混凝土结构。本书对上述两大类纤维增强水泥基复合材料的组成材料与配方、制备工艺、复合材料性能及应用领域等分别加以详尽的介绍，并列举其典型的品种，使读者对这两类复合材料可明确区分而不致混淆。

全书共分为四篇，第一篇为“绪论”，包括定义、发展简史、纤维与水泥基体在复合材料中的作用及交互影响、成型工艺的选用以及力学性能的主要特征。目的在于使读者可获得有关纤维增强水泥与纤维增强混凝土的基本知识。第二篇为“纤维增强水泥”，对 6 个主要品种分别作了详细的介绍。第三篇为“钢纤维增强混凝土”，鉴于此种纤维增强混凝土已有将近 40 年的发展历史，在国内外获得广泛的应用，故对其中较为常用的品种作深入的介绍。第四篇介绍了几种合成纤维增强混凝土与混合纤维增强混凝土。

书中对纤维增强水泥与纤维增强混凝土各个主要品种的配方与制作工艺均一一作了较详尽的介绍，对读者有实用的参考价值。尤其是对钢纤维增强混凝土与合成纤维增强混凝土的质量控制与施工要领等均有详细的说明，并列举了若干典型工程的施工概况与使用效果等。

本书引用了国内外大量有关纤维增强水泥与纤维增强混凝土方面的文献资料，其中有些是近年的最新研究、开发成果。例如，建筑内外墙用高致密硅酸钙板、改性聚丙烯细纤维与改性聚丙烯粗纤维配制的两种合成纤维混凝土、钢纤维膨胀混凝土、钢纤维碾压混凝土、层布钢纤维混凝土等均是我国自行研究开发的新成果。对法国开发的活性粉末水泥复合材料、德国开发的纤维织物增强水泥、美国研制的高压挤制的混合纤维增强水泥以及澳大利亚等国正在推广的粗合成纤维增强混凝土等也作了介绍。

本书分四篇共二十一章，其中第一至四章、第八章、第九章第二节与第三节、第十章、第十八章第一节、第二十章由沈荣熹编写，第十一至十七章、第十九章、第二十一章由王璋水编写，第五至七章由崔玉忠编写。约请苏州混凝土水泥制品研究院原副总工程师叶启汉教授撰写了第九章第一节，约请北京工业大学邓宗才教授撰写了第十八章第二节。全书由沈荣熹统稿，崔玉忠汇总编排。

我们在编写过程中得到了中国工程院赵国藩、唐明述与孙伟三位院士的指导与鼓励；孙伟院士为本书作序；中国建筑材料科学研究总院姚燕院长、隋同波副院长与该院水泥科学与新型建材研究所所长崔琪、中国建筑材料工业协会徐永模副会长以及中国建筑材料工业协会 GRC 分会曹永康名誉理事长等给予大力支持；建筑材料工业技术情报研究所徐洛屹副所长给我们提供了广泛查阅国内外文献的便利条件；江苏爱富希新型建材有限公司朱家振董事长等提供了高致密硅酸钙板（卡复板）研发及其应用的资料；中国社会科学院数量经济与技术经济研究所龚益研究员提供了有关杜拉纤维应用方面的资料；北京中纺纤建科技有限公司史小兴总经理等提供了 CTA 聚丙烯细纤维及其应用的资料；深圳市海川实业股份有限公司何唯平执行董事等提供了路威 2002 聚丙烯腈纤维（PANF）及其应用的资料；宁波大成新材料股份有限公司陈成泗总经理等提供了 DC 聚丙烯粗纤维及其应用的资料；在撰写本书第四章过程中还得到了邓宗才教授与李清海博士的大力协助。在此向他们一一致以诚挚的谢意。

书中不妥之处恐在所难免，敬祈广大读者不吝指正。

作者谨识
2006 年 6 月

目 录

第一篇 绪 论

第一章 导言	3
第一节 定义	3
第二节 发展简史	4
第二章 纤维与水泥基体在复合材料中的作用及相互影响	8
第一节 纤维的作用	8
第二节 水泥的作用	12
第三节 纤维与水泥在复合材料中的相互影响	12
第三章 纤维增强水泥基复合材料成型工艺的选用	14
第一节 纤维增强水泥的成型工艺	14
第二节 纤维增强混凝土的成型工艺	16
第四章 纤维增强水泥基复合材料力学性能的主要特征	18
第一节 轴向拉伸性能	18
第二节 弯曲性能	23
第三节 弯曲韧性	27
第四节 抗冲击性	31
第五节 抗疲劳性	34
参考文献	38

第二篇 纤维增强水泥

第五章 玻璃纤维增强水泥	41
第一节 原材料	41
第二节 配合比	47
第三节 制作工艺	47
第四节 物理力学性能	57
第五节 耐久性	63
第六节 应用	67
附录: GRC 产品的制造、养护与试验规范	78
第六章 聚乙烯醇纤维增强水泥	87

第一节	原材料	87
第二节	配合比	89
第三节	制作工艺	91
第四节	物理力学性能	94
第五节	耐久性	96
第六节	应用	98
第七章	天然植物纤维增强水泥	100
第一节	原材料	100
第二节	配合比	103
第三节	制作工艺	104
第四节	物理力学性能	106
第五节	耐久性	112
第六节	应用	116
第八章	碳纤维增强水泥	119
第一节	原材料与配合比	119
第二节	制作工艺	121
第三节	性能	123
第四节	应用	129
第九章	混合纤维增强水泥	131
第一节	温石棉-聚乙烯醇纤维增强水泥	131
第二节	聚丙烯纤维-玻璃纤维增强水泥	137
第三节	玻璃纤维-聚乙烯醇纤维-聚丙烯纤维增强水泥	143
第十章	高性能纤维增强水泥	148
第一节	注浆纤维增强水泥	149
第二节	注浆纤维网增强水泥	153
第三节	活性粉末水泥复合材料	155
参考文献		163

第三篇 钢纤维增强混凝土

第十一章	钢纤维增强普通混凝土	169
第一节	原材料与配合比	169
第二节	制备工艺及拌和料特性	177
第三节	物理力学性能	184
第四节	工程应用	198
第十二章	钢纤维高强混凝土与钢纤维高性能混凝土	204

第一节	原材料与配合比	205
第二节	制备工艺及拌和料性能	209
第三节	物理力学性能	212
第四节	工程应用	222
第十三章	钢纤维增强膨胀混凝土	224
第一节	原材料与配合比及配制工艺	224
第二节	物理力学性能	225
第三节	工程应用	233
第十四章	钢纤维增强耐火混凝土	236
第一节	原材料与配制	236
第二节	物理力学性能	238
第三节	工程应用	245
第十五章	钢纤维增强碾压混凝土	249
第一节	原材料与配制	249
第二节	拌和料性能	250
第三节	力学性能	254
第四节	工程应用	256
第十六章	层布钢纤维混凝土	258
第一节	原材料与配合比	258
第二节	物理力学性能	259
第三节	层布钢纤维混凝土路面厚度的确定	265
第四节	层布钢纤维混凝土路面施工工艺及检验	266
第五节	工程应用	267
第十七章	钢纤维喷射混凝土	270
第一节	原材料与配合比	270
第二节	施工方法	275
第三节	力学性能要求及试验方法	278
第四节	工程应用	281
参考文献		286

第四篇 合成纤维增强混凝土与混合纤维增强混凝土

第十八章	聚丙烯纤维增强混凝土	291
第一节	聚丙烯细纤维增强混凝土	291
第二节	聚丙烯粗纤维增强混凝土	307
第十九章	聚丙烯腈纤维增强混凝土	319

第一节	原材料与配合比及制备工艺	319
第二节	拌和料性能	321
第三节	物理力学性能	322
第四节	工程应用	328
第二十章	聚酰胺纤维增强混凝土与聚乙烯醇纤维增强混凝土	330
第一节	聚酰胺纤维增强混凝土	330
第二节	聚乙烯醇纤维增强混凝土	335
第二十一章	混合纤维增强混凝土与组合纤维增强混凝土	341
第一节	不同尺度钢纤维混合增强混凝土	341
第二节	钢纤维与合成纤维混合增强混凝土	344
第三节	层布钢纤维和合成纤维组合增强混凝土	349
第四节	工程应用	356
参考文献		358

第一篇

绪

论

第一章 导 言

水泥仍是当今人类社会用量最大、应用范围最广泛的建筑材料。水泥基材料（水泥净浆、砂浆与混凝土）纵然具有很高的抗压强度，但存在抗拉强度低、抗裂性差和脆性大等缺点。其抗拉强度仅是抗压强度的 $1/10 \sim 1/7$ ，受拉的极限延伸率只有 $0.01\% \sim 0.06\%$ ，在较低的拉伸变形时即易发生开裂。其断裂能为 $20 \sim 80 \text{J/m}^2$ ，仅是铝此指标值的 $0.2\% \sim 0.8\%$ 。随着水泥基材料抗压强度的大幅度提高，其收缩与脆性问题也更为突出。水泥基材料的上述缺点是本质性的，不可能通过本身材质的改良来解决，只有采用“复合化”的技术途径，由此开发了一系列的水泥基复合材料，如钢筋混凝土、预应力混凝土、自应力混凝土、钢丝网水泥、纤维增强水泥基复合材料以及聚合物混凝土等。

本书主要介绍纤维增强水泥基复合材料（fibre reinforced cement-based composite）的分类以及各类中主要品种的配制、性能与应用。

第一节 定 义

在水泥基复合材料中通常将以水泥为主组分的连续相称为“水泥基体”。因基体组成的不同，可将纤维增强水泥基复合材料分为两大类。当用水泥净浆或砂浆做基体时，名之为“纤维增强水泥”（fibre reinforced cement）；当用混凝土做基体时，名之为“纤维增强混凝土”（fibre reinforced concrete）。这样的分类主要是考虑到因基体的不同而使纤维与基体的相互影响以及复合材料的制备工艺等有很大差异，从而影响到复合材料的性能及其应用范围等。表 1.1 对纤维增强

表 1.1 纤维增强水泥与纤维增强混凝土的对比

对 比 项	纤维增强水泥	纤维增强混凝土
水泥基体	水泥净浆或砂浆	混凝土
纤维长度	短纤维、长纤维、纤维织物或短纤维与长纤维(或纤维织物)并用	短纤维
纤维体积率	$3\% \sim 20\%$	$0.05\% \sim 2\%$
复合材料的制备	采用专门的工艺与装备	一般采用普通混凝土的工艺与装备
复合材料的物理、力学性能	有显著的改进或提高,尤其是力学性能	某些性能无影响,某些性能有适度改进或提高
应用范围	主要用于制作薄壁(厚度 $3 \sim 20 \text{mm}$)的预制品	主要用于现场浇筑的构件或构筑物