



沈荣熹 崔琪 李清海 著

NEW TYPE FIBRE REINFORCED  
CEMENT-BASED COMPOSITES

# 新型纤维 增强水泥基复合材料

中国建材工业出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

# 新型纤维增强水泥基复合材料

NEW TYPE FIBRE REINFORCED CEMENT-BASED COMPOSITES

沈荣熹 崔 琪 李清海◎著

中国建材工业出版社

### 图书在版编目 (CIP) 数据

新型纤维增强水泥基复合材料/沈荣熹, 崔琪, 李清海著. -北京: 中国建材工业出版社, 2004.3

ISBN 7-80159-609-9

I. 新... II. ①沈... ②崔... ③李... III. 纤维增强水泥-纤维增强复合材料 IV. TU528.58

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 024068 号

### 新型纤维增强水泥基复合材料

沈荣熹 崔琪 李清海著

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: 787mm × 1092mm 1/16

印张: 25

字数: 618 千字

版次: 2004 年 3 月第一版

印次: 2004 年 3 月第一次

印数: 1 ~ 3000 册

书号: ISBN 7-80159-609-9/TU·324

定价: 75.00 元

---

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) 68345931

## [序]

当今材料领域内，复合化是改进与提高材料性能、开发新材料品种并扩大其应用范围的重要技术途径。纤维增强水泥基复合材料（fiber reinforced cement-based composite）是由纤维（金属的、无机的或有机的）与水泥基材（净浆、砂浆或混凝土）复合制成的，根据所用纤维的材质、性能、外形、尺寸、掺量、取向及其与基材的界面黏结等因素，可使水泥基材的抗裂性、抗拉（弯）强度、韧性、抗冲击性与抗疲劳性等有一定程度的提高。自 20 世纪 70 年代以来，纤维增强水泥基复合材料已日益引起材料界与工程界的广泛重视，研究工作不断深入，新品种相继问世，应用领域逐步扩大，已由早期的预制品制作发展到目前大量应用于公路、桥梁、机场、隧道、水利与军事等工程中。由于石棉粉尘有害于人体，传统的石棉水泥制品已逐渐被以合成纤维与纤维素纤维作为增强材的非石棉纤维水泥制品取代。采取抗碱玻璃纤维与低碱度水泥或改性波特兰水泥复合的措施使玻璃纤维增强水泥（GRC）的长期耐久性得以保证，因而可用以制作某些承重构件。多种合成纤维（丙纶、维纶、腈纶、尼龙等）已广泛用于现浇混凝土中，有效地控制混凝土因沉降与塑性收缩引发的裂缝，改善了其抗渗、抗冻与抗冲击等性能，提高了工程的耐久性。碳纤维加入砂浆或混凝土中已可制成具有应力/应变敏感特性的智能混凝土（smart concrete）。更引人瞩目的是近年来开发成功的多种高性能纤维增强混凝土（high performance fiber reinforced concrete），兼具高抗拉（弯）、高韧性、高抗震、高抗爆、高抗渗与高耐久等一系列优异特性。例如，活性粉末混凝土（reactive powder concrete, RPC）是由细钢纤维、水泥、细砂、石英粉与硅灰等所组成的复合材料，其弯拉强度、断裂能与金属铝相近，用 RPC 制成的构件的价格比钢低，其尺寸、单位长度质量则显著低于承重能力与之相当的钢筋混凝土和预应力混凝土构件，有十分广阔的应用前景。高性能纤维增强混凝土有可能使未来的混凝土结构发生重大变革。

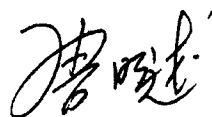
《新型纤维增强水泥基复合材料》一书的作者在综述该复合材料的发展历史、分类方法、

---

组成材料、增强机制、制作工艺与性能检测的基础上，将近二十多年来国内外研制与开发的一系列新型纤维增强水泥基复合材料分为七个大类，对各个大类中主要品种的配制原理、制备工艺要领、物理力学性能与耐久性以及应用领域与开发前景等都做了详尽的阐述。该书是我国第一本全面介绍各类新型纤维增强水泥基复合材料的专著。

该书的主要作者沈荣熹教授从事纤维增强水泥基复合材料的研究与开发工作已有四十余年，是主要学术带头人，在国际同行中也享有一定的声誉，他在这方面已取得多项科研成果并发表了大量论文，积累了丰富的经验。第二作者崔琪教授级高工从事该复合材料的研发工作也已有二十余年，取得了多项创造性的成果。第三作者李清海高工是参与该复合材料研发工作的后起之秀，具有开拓与创新精神。他们还邀请了国内有关的学者与专家参与了部分章节的撰写，使该书的内容更为丰富与充实。

该书系统性好，逻辑性强，资料来源广，信息量大，对从事纤维增强水泥复合材料的研究、设计、教学、生产和施工人员均有重要的参考与指导价值。该书的出版无疑会对水泥基复合材料的发展起积极的推动作用，特为之序。



中国工程院院士  
南京工业大学教授

2003年11月

## [ 前言 ]

---

21 世纪, 水泥基材料仍是人类社会最广泛使用的大宗建筑材料, 此类材料纵然具有众多的优点, 但存在收缩大、抗拉强度与抗压强度比值小, 以及断裂韧性低等本质性的弱点。随着水泥基材料抗压强度的大幅度提高, 干缩与脆性问题也更为突出。为全面克服其上述缺点, 最有效的办法是掺加纤维。我国著名混凝土专家、中国工程院资深院士吴中伟教授生前曾多次指出“复合化是水泥基材料高性能化的主要途径, 纤维增强是其核心”。

诞生于 20 世纪初的石棉水泥是国际上最早开发的纤维增强水泥基复合材料, 自 60 年代中期起, 钢纤维混凝土在土木工程中获得日益广泛的应用。随着材料科学的不断发展, 水泥基材料的日益趋于高性能化以及多种人造纤维的相继问世, 使纤维增强水泥基复合材料发展到一个新的阶段, 其主要标志是近 20 多年来国际上涌现出愈来愈多的、各具特色的、不同用途的新型纤维增强水泥基复合材料。例如, 鉴于石棉粉尘对人体健康的危害, 很多发达国家已用非石棉纤维水泥制品(如压蒸木浆纤维增强水泥、高模量合成纤维增强水泥等)完全替代石棉水泥制品; 由于采取抗碱玻璃纤维与低碱度水泥或改性波特兰水泥相复合的技术措施, 使玻璃纤维增强水泥(GRC)可用于制作某些承重构件; 为解决化冰盐对钢筋的侵蚀问题, 加拿大成功地用聚丙烯纤维增强混凝土浇筑了 Salmon 河上一座公路桥的面板; 法国用金属玻璃纤维增强混凝土制作使用寿命可达 300 年以上的核废料贮存器; 美国用高钢纤维掺量的注浆纤维混凝土(SIFCON)建造导弹发射井; 法国开发的用细钢纤维做增强材料的活性细粒混凝土(RPC)兼具高抗拉强度与高韧性, 因而有可能用以代替钢材建造高荷载结构; 丹麦正在积极将同时掺加细钢纤维与配置密间距钢筋的密实配筋复合材料(CRC)推向实用阶段; 美国正在研究利用碳纤维增强混凝土在低应力下的压敏性与温敏性, 用以制作可自诊断的智能型混凝土构筑物。多年来, 我国有关科研设计单位、高等院校、生产企业与工程单位密切合作, 紧紧跟踪此类复合材料的国际发展动向, 结合我国国情, 大力研究与开发

---

多种新型纤维增强水泥基复合材料，其中有些已开始进入实用阶段，在理论研究上也取得一定进展，但在总体水平上，尤其是商业应用方面，与发达国家相比还存在较大的差距。

为全面了解当前国内外新型纤维增强水泥基复合材料的研发成果与发展动向，广大读者渴望能有一本这方面的专著。有鉴于此，本书作者们引用国内外大量的有关文献资料，将近20多年来国际上研制与开发的新型纤维增强水泥基复合材料（不包括石棉水泥与普通钢纤维混凝土）归纳成为七大类，即：①金属纤维增强水泥基复合材料；②玻璃纤维增强水泥基复合材料；③合成纤维增强水泥基复合材料；④天然有机纤维增强水泥基复合材料；⑤碳纤维增强水泥基复合材料；⑥混杂纤维增强水泥基复合材料；⑦高性能纤维增强水泥基复合材料。在综述纤维增强水泥基复合材料定义、发展历史、分类方法、组成材料、复合增强机制、制备工艺以及性能检测技术的基础上，对以上各类新型纤维增强水泥基复合材料的各个主要品种的配制原理、制备工艺要领、物理力学性能与耐久性、应用范围以及开发前景等分别做了详细的介绍与叙述，以飨广大读者。

鉴于境内外本专业的中文名词术语尚未完全统一，为便于境外同仁阅读本书，特在书后附有中英文名词术语对照以供参考。

在本书撰写过程中，得到了中国工程院赵国藩院士与唐明述院士的指导与鼓励。中国建筑材料科学研究院姚燕院长与曹永康教授等给予我们大力支持。对此向他们致以衷心的感谢。

我们还特邀东南大学孙伟教授、大连理工大学黄承逵教授、同济大学马一平教授、中国建筑材料科学研究院刘根荣教授、空军工程设计研究局王璋水高级工程师与北京工业大学邓宗才博士撰写了本书中有关内容。清华大学廉慧珍教授、中国建筑材料科学研究院金宗哲教授与包亦望教授审阅了本书的部分章节，提出了宝贵的补充与修改意见。本书能顺利完成，

1	<b>第 1 章 绪 论</b>
1	1.1 纤维增强水泥基复合材料的定义
1	1.2 纤维增强水泥基复合材料的发展历史
3	1.3 纤维增强水泥基复合材料的分类
6	1.4 新型纤维增强水泥基复合材料的类别与品种
8	参考文献
10	<b>第 2 章 纤维增强水泥基复合材料的组成材料</b>
10	2.1 纤维增强材
10	2.1.1 纤维在纤维增强水泥基复合材料中的作用
10	2.1.2 对纤维增强材的技术要求
11	2.1.3 新型纤维增强水泥基复合材料用的纤维增强材
31	2.2 基 材
31	2.2.1 基材在纤维增强水泥基复合材料中的作用
32	2.2.2 水泥基材的分类
32	2.2.3 水泥基材主要组分及其性能
46	参考文献
49	<b>第 3 章 纤维与水泥基材的复合增强作用</b>
49	3.1 概 述
50	3.2 影响纤维与水泥基材复合增强作用的要素
56	3.3 纤维增强水泥基复合材料限制收缩时纤维的阻裂作用
56	3.3.1 水泥基材的收缩
57	3.3.2 纤维在水泥基材限制收缩时的阻裂作用



58	3.3.3	预测纤维增强水泥基复合材料收缩裂缝的理论模型
59	3.4	纤维增强水泥基复合材料受拉时纤维与水泥基材的复合增强作用
59	3.4.1	纤维增强水泥基复合材料受拉的破坏模式
60	3.4.2	预测纤维增强水泥基复合材料受拉时力学性能的理论模型
61	3.4.3	预测纤维增强水泥基复合材料受拉力学性能的复合材料模型
66	3.4.4	预测纤维增强水泥基复合材料受拉力学性能的多缝开裂模型
71	3.4.5	预测纤维增强水泥基复合材料受拉力学性能的断裂力学模型
80	3.5	纤维增强水泥基复合材料受弯时纤维与水泥基材的复合增强作用
80	3.5.1	纤维增强水泥基复合材料受弯时的力学行为及其机制
82	3.5.2	纤维增强水泥基复合材料的弯拉强度与抗拉强度的相互关系
83	3.6	纤维增强水泥基复合材料的韧性
85		参考文献
88		<b>第4章 纤维增强水泥基复合材料的制作工艺</b>
88	4.1	纤维增强水泥的制作工艺
88	4.1.1	概 述
89	4.1.2	抄 取 法
90	4.1.3	流 浆 法
91	4.1.4	马雅尼制瓦法
92	4.1.5	马雅尼制承口管法
92	4.1.6	希马尼脱法
92	4.1.7	高速单层成型法
93	4.1.8	注 射 法
93	4.1.9	抹 浆 法
93	4.1.10	振 动 法
93	4.1.11	喷 射 法
94	4.1.12	预混-喷射法
95	4.1.13	挤 出 法
96	4.1.14	真空抽吸-高压挤出法

97	4.1.15 韦尔克莱脱法
98	4.1.16 雷铁弗尔法
100	4.1.17 成组立模法
100	4.2 纤维增强混凝土的制作工艺
102	参考文献
104	<b>第 5 章 纤维增强水泥基复合材料的性能 试验方法</b>
104	5.1 纤维增强水泥的性能试验
104	5.1.1 玻璃纤维增强水泥
111	5.1.2 维纶纤维增强水泥板与其他非石棉纤维水泥板
114	5.1.3 非石棉硅酸钙板
118	5.2 纤维增强混凝土的性能试验
118	5.2.1 纤维混凝土拌合物的试验
124	5.2.2 硬化纤维增强混凝土的性能试验
142	参考文献
143	<b>第 6 章 金属纤维增强水泥基复合材料</b>
143	6.1 钢纤维增强高强混凝土
143	6.1.1 配制原理与制备工艺
144	6.1.2 材料性能
149	6.1.3 耐久性
151	6.1.4 应用和开发前景
152	6.2 钢纤维增强膨胀混凝土
152	6.2.1 配制原理与制备工艺
153	6.2.2 变形性能
154	6.2.3 强 度
157	6.2.4 结构性能
160	6.2.5 应用与开发前景
161	6.3 不锈钢纤维增强耐火混凝土
161	6.3.1 配制原理与制备工艺
163	6.3.2 性 能
169	6.3.3 应用与开发前景
171	6.4 金属玻璃纤维增强混凝土
171	6.4.1 配制原理与制备工艺
173	6.4.2 性 能
175	6.4.3 应用与开发前景
176	6.5 钢棉增强水泥
176	6.5.1 配制原理与制备工艺

177	6.5.2 性能
178	6.5.3 开发前景
179	参考文献
182	<b>第 7 章 玻璃纤维增强水泥基复合材料</b>
182	7.1 概述
183	7.2 GRC 的耐久性及其影响因素
183	7.2.1 抗碱玻璃纤维在硅酸盐系列水泥中的耐蚀性
185	7.2.2 抗碱玻璃纤维增强波特兰水泥 (OPC/GRC) 在不同环境中的耐久性
186	7.2.3 用快速老化法预测 GRC 的长期耐久性
187	7.2.4 抗碱玻璃纤维在波特兰系列水泥中质变的机制
188	7.3 抗碱玻璃纤维增强低碱度水泥 (LAC/GRC)
188	7.3.1 中国的抗碱玻璃纤维增强硫铝酸盐水泥
204	7.3.2 日本的抗碱玻璃纤维增强 CGC 水泥 (CGC/GRC)
211	7.4 抗碱玻璃纤维增强改性波特兰系列水泥
212	7.4.1 在波特兰水泥中掺加高火山灰活性的矿物细掺料
214	7.4.2 在波特兰水泥中掺加某些聚合物乳液
215	7.4.3 在波特兰水泥中同时掺加特选的偏高岭土与聚合物乳液
217	7.4.4 在波特兰水泥中同时掺加硫铝酸钙、无水石膏与偏高岭土
218	7.4.5 对 OPC/GRC 进行超临界碳酸化处理
218	7.4.6 应用与开发前景
219	参考文献
224	<b>第 8 章 合成纤维增强水泥基复合材料</b>
224	8.1 丙纶纤维增强水泥基复合材料
224	8.1.1 丙纶纤维增强水泥
232	8.1.2 丙纶短纤维增强混凝土
245	8.2 维纶纤维增强水泥基复合材料
245	8.2.1 维纶纤维增强水泥
255	8.2.2 维纶纤维增强混凝土
258	8.3 腈纶纤维增强水泥基复合材料
258	8.3.1 腈纶纤维增强水泥
260	8.3.2 腈纶纤维增强混凝土

265	8.4 尼龙纤维增强水泥基复合材料
273	8.5 乙纶纤维增强水泥基复合材料
273	8.5.1 低模量乙纶纤维增强水泥基复合材料
276	8.5.2 高模量乙纶纤维增强水泥基复合材料
279	8.6 芳纶纤维增强水泥基复合材料
279	8.6.1 凯芙拉纤维增强水泥基复合材料
281	8.6.2 特克努拉纤维增强水泥基复合材料
283	参考文献
290	<b>第 9 章 天然有机纤维增强水泥基复合材料</b>
290	9.1 概    述
290	9.2 木浆纤维增强水泥
290	9.2.1 配制原理
291	9.2.2 制作工艺
292	9.2.3 物理力学性能
295	9.2.4 耐    久    性
296	9.2.5 应用与开发前景
297	9.3 非木浆植物纤维增强水泥
297	9.3.1 非木浆植物纤维增强水泥的耐久性及其影响因素
298	9.3.2 改善非木浆植物纤维增强水泥的耐久性技术途径
300	9.3.3 应用与开发前景
301	参考文献
303	<b>第 10 章 碳纤维增强水泥基复合材料</b>
303	10.1 概    述
303	10.2 PAN 基碳纤维增强水泥
303	10.2.1 配制原理与制备工艺
304	10.2.2 物理性能
308	10.2.3 力学性能
309	10.2.4 耐    久    性
309	10.3 沥青基碳纤维增强水泥
309	10.3.1 配制原理与制备工艺
309	10.3.2 物理性能
312	10.3.3 力学性能
316	10.3.4 耐    久    性
316	10.3.5 应用与开发前景
318	参考文献

321	<b>第 11 章 混杂纤维增强水泥基复合材料</b>
321	11.1 概 述
322	11.2 钢纤维与合成纤维混杂增强水泥基复合材料
322	11.2.1 钢纤维-乙纶纤维增强水泥基复合材料
323	11.2.2 钢纤维-维纶纤维增强水泥基复合材料
324	11.2.3 钢纤维-丙纶纤维增强水泥基复合材料
327	11.2.4 钢纤维-尼龙纤维增强水泥基复合材料
328	11.3 玻璃纤维与合成纤维混杂增强水泥基复合材料
328	11.3.1 纤化聚丙烯薄膜-玻璃纤维增强水泥基复合材 料
329	11.3.2 玻璃纤维-维纶纤维-丙纶纤维增强水泥基复合 材料
330	11.4 碳纤维与合成纤维混杂增强水泥基复合材料
330	11.4.1 碳纤维无捻粗纱-纤化聚丙烯薄膜增强水泥
332	11.4.2 碳纤维-丙纶纤维增强混凝土
335	11.4.3 碳纤维-尼龙纤维增强水泥
336	参考文献
338	<b>第 12 章 高性能纤维增强水泥基复合材料</b>
338	12.1 概 述
339	12.2 注浆纤维混凝土
339	12.2.1 配制原理与制备工艺
340	12.2.2 性 能
349	12.2.3 在混凝土构件中的作用
351	12.2.4 应用与开发前景
352	12.3 注浆网混凝土
352	12.3.1 配制原理与制备工艺
352	12.3.2 性 能
354	12.3.3 与混凝土、钢筋混凝土的叠合
358	12.3.4 应用与开发前景
358	12.4 纤维增强均布超细粒致密体系
358	12.4.1 配制原理与制备工艺
359	12.4.2 性 能
360	12.4.3 应用与开发前景
360	12.5 密实配筋复合材料 (CRC)
360	12.5.1 配制原理与制备工艺
362	12.5.2 性 能
363	12.5.3 应用与开发前景

363	12.6 活性粉末混凝土
363	12.6.1 配制原理与制备工艺
365	12.6.2 性    能
366	12.6.3 应用与开发前景
367	12.7 纤维增强无宏观缺陷水泥
367	12.7.1 配制原理与制备工艺
368	12.7.2 性    能
370	12.7.3 应用与开发前景
370	参考文献
374	中英文名词术语对照

# 第1章 绪 论

## 1.1 纤维增强水泥基复合材料的定义

将两种或两种以上的不同材料按一定方式结合在一起,除了保留原组成材料各自的特性外,还产生一种性能显著优于任何一种组成材料的新材料,此新材料即称为“复合材料”(composite)。与单一材料相比,复合材料可使材料的力学、物理与化学等性能有明显的改善。复合材料一般包含两个相,一为连续相,常称为“基材”(matrix);一为分散相,分散相可以是胶体状、颗粒状或纤维状的。当用水泥净浆、砂浆或混凝土做基材(统称“水泥基材”cement matrix),用纤维(fibre)做增强材(reinforcement),则所组成的复合材料可统称为“纤维增强水泥基复合材料”(fibre reinforced cement-based composite)或“纤维增强水泥复合材料”(fibre reinforced cement composite,缩写为FRCC),甚或简称为“纤维水泥复合材料”(fibre cement composite)。

美国混凝土协会(ACI)的544委员会将上述的纤维增强水泥基复合材料称为“纤维增强混凝土”(fibre reinforced concrete),并对它下了这样一个定义<sup>[1-1]</sup>:“纤维增强混凝土系含有细集料或粗、细集料的水硬性水泥与非连续的分散纤维组成的混凝土,连续的网片、织物与长棒不属于分散纤维类的增强材”。我们认为这个定义不够完善:第一,所用水泥基材除了砂浆与混凝土外,还可用净浆;第二,所有纤维增强材,除了短纤维外,还可用连续的长纤维、网格布与纤化薄膜等。因此,本书作者认为其确切定义应是:“纤维增强水泥基复合材料是以水泥净浆、砂浆或混凝土做基材,以非连续的短纤维或连续的长纤维做增强材组合成的复合材料。当所用水泥基材为水泥净浆或砂浆时,称之为纤维增强水泥(fibre reinforced cement);当所用水泥基材为混凝土时,则称之为纤维增强混凝土(fibre reinforced concrete)”。

当用纤维增强树脂(fibre reinforced plastic,缩写为FRP)的筋棒、网片或三维型材做水泥砂浆或混凝土的增强材时,由于所用增强材已非纯粹连续长纤维,故此复合材料不应归属于纤维增强水泥基复合材料。

## 1.2 纤维增强水泥基复合材料的发展历史

纤维增强水泥基复合材料的发展过程可划分为如下几个阶段:

### 1. 距今1000多年前至19世纪末

在古代,先人们即用天然纤维作为某些无机胶结料的增强材,以减少收缩裂缝,保持整体性并降低脆性。例如,中国山西平遥古城附近的双林寺,已历时1000余年,寺内10余座大殿的砖墙,均用掺有麻丝的石灰黏土做抹灰料。图1-1是由该寺一大殿的外墙上取下的已风化抹灰料,其中的麻丝纤维清晰可见。

中国古代流传至今的具有数百年历史的众多庙宇中供奉的塑像是由掺有植物纤维(麻丝、稻草或棕榈纤维等)的黏土塑造而成的。古埃及人用掺有稻草的黏土制成太阳晒干的实

心砖，古罗马人将马的鬃毛剪短后掺入石膏浆体中<sup>[1-1]</sup>，可见用多种天然纤维增强脆性无机胶结料在人类历史上已沿用了1 000多年。

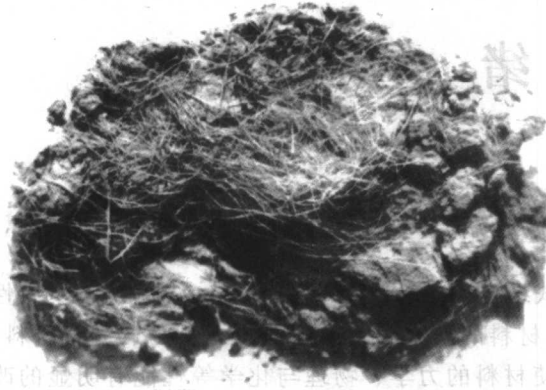


图 1-1 中国山西双林寺一大殿外墙的风化抹灰料

## 2. 20 世纪初至 30 年代

奥匈帝国的 Ludwig Hatschek (1856 ~ 1919 年) 于 1900 年发明用圆网抄取机制造石棉水泥板，并在 Voeklbruck 建立了世界上第一座石棉水泥制品工厂，首创用纤维增强水泥净浆制成薄壁制品<sup>[1-2]</sup>。1912 年意大利的 Adolf Mazza 发明用抄取法制造石棉水泥管。至 20 世纪 30 年代，全世界已有 37 个国家生产石棉水泥制品<sup>[1-2]</sup>，石棉水泥在世界范围内已形成一门产业。

从 1911 年至 1933 年间，美、英、法等国均有人建议在混凝土或钢筋混凝土中掺加短切钢丝或其他金属丝以改善它们的性能，并申请了专利，但当时并未引起广泛的兴趣。

## 3. 20 世纪 40 年代至 50 年代

1942 ~ 1943 年意大利的 Nervi 发明了钢丝网水泥 (ferro-cement)，实际上可视作用连续的钢纤维所制成网片增强的水泥砂浆，可用以制作某些薄壁制品，但一般并不将它列入纤维增强水泥基复合材料。

在此时期内，有人探索用石棉以外的其他纤维增强水泥基材的可能性。例如，在第一次与第二次世界大战期间，欧洲有些国家在制造石棉水泥制品时，用纸浆纤维或矿物棉代替部分或全部石棉。

20 世纪 50 年代末至 60 年代初中国前水泥工业研究院等单位探索用中碱玻璃纤维增强普通硅酸盐水泥砂浆或混凝土<sup>[1-3]</sup>。前苏联 Birykovich 等探索用无碱玻璃纤维 (即 E-玻璃纤维) 增强石膏矾土水泥砂浆<sup>[1-4]</sup>。但嗣后因发现水泥水化物对中碱或无碱玻璃纤维的碱性侵蚀而未能获得成功。

## 4. 20 世纪 60 年代至 70 年代

此时期内新型纤维增强水泥基复合材料的开发有较大的进展，尤其是玻璃纤维增强树脂基复合材料的迅速发展对之起了一定的刺激与推动作用。

1963 年，美国 Romualdi 提出了“纤维阻裂机理”<sup>[1-5]</sup>，促进了钢纤维增强混凝土的开发。从 70 年代起钢纤维增强混凝土 (steel fibre reinforced concrete, 缩写为 SFRC) 开始进入实用阶段。

1964 年，丹麦 Krenchel 的博士论文《纤维增强材》(《Fibre Reinforcement》)<sup>[1-6]</sup>首次应用复合材料理论探讨了纤维增强无机胶凝材料的机理。

60 年代中期，美国 Goldfein 等进行了用尼龙、聚丙烯等人造合成纤维增强水泥砂浆的探索性研究<sup>[1-7]</sup>。

1967 年，英国建筑科学研究院 (BRE) 的 Majumdar 试制成含锆的抗碱玻璃纤维并继而研制了抗碱玻璃纤维增强波特兰水泥砂浆，1971 年起英国开始生产牌号为 Cem-FIL 的抗碱玻璃纤维与玻璃纤维增强水泥 (glass fibre reinforced cement, 缩写为 GRC 或 GFRC)，美、日等国也相继进行了 GRC 的小批量生产。70 年代国际土建材料界曾一度出现所谓“纤维热”，其重要标志是从 1972 年起国际上曾多次召开规模不等的纤维增强水泥基复合材料学术讨论会；



其中规模较大的一次是1975年9月由国际材料与结构试验室联合会(RILEM)主办的在伦敦召开的国际纤维增强水泥与混凝土学术讨论会<sup>[1-8]</sup>,有36个国家、300多名代表出席。

### 5. 20世纪80年代至21世纪初

鉴于石棉中所含微细纤维(直径 $\leq 3\ \mu\text{m}$ )有害于人体,从80年代初期起,若干发达国家相继限制石棉水泥制品的生产与使用,因而推动了非石棉纤维水泥(non-asbestos fibre cement或称无石棉纤维水泥 asbestos-free fibre cement)制品的研制与开发<sup>[1-9,1-10]</sup>。非石棉纤维水泥制品的主要品种有压蒸的木浆纤维增强水泥、木浆纤维增强硅酸钙、抗碱玻璃纤维增强水泥以及合成纤维增强水泥,这些品种已投入工业规模的生产。此外,还研制了碳纤维增强水泥、压蒸的芳纶纤维增强水泥等,但因价格较贵,尚难大量推广。

1979年英国建筑科学研究院(BRE)公布了GRC的10年材性报告<sup>[1-11]</sup>,发现抗碱玻璃纤维增强波特兰水泥历时10年的材性变化结果表明:在干燥环境中其力学性能无明显变化,但在潮湿环境中或经大气暴露后其抗拉强度、弯拉强度和韧性均明显下降,为此在80年代内国际上有关科研单位均致力于提高GRC长期耐久性的研究。为提高GRC的耐久性,西方国家主要采取了抗碱玻纤外覆阻蚀膜层、波特兰水泥中外掺高火山灰活性混合材或聚合物乳液等措施;中国建筑材料科学研究院则采取了抗碱玻璃纤维与低碱度水泥相复合的“双保险”技术措施,取得明显成效,并在国际同行中引起了较大反响<sup>[1-12]</sup>。

80年代初期美国大力开发合成纤维增强混凝土(synthetic fibre reinforced concrete,缩写为SNFRC)<sup>[1-13]</sup>。所用合成纤维主要有聚丙烯或尼龙等,在开发过程中发现即使掺入少量(体积率为0.1%~0.3%)合成纤维于混凝土中,就可起到明显的阻裂与增韧效应,该技术在实际工程中广为应用。

美国Lankard发明的高强度、高韧性的注浆纤维增强混凝土(slurry infiltrated fibre concrete,缩写为SIFCON)<sup>[1-13]</sup>,适用于若干有特殊要求的工程中。

不少发展中国家致力于研究用植物纤维做增强材制造价格较低廉的纤维水泥制品<sup>[1-14]</sup>。一系列高性能纤维增强水泥基复合材料相继问世,已初步应用于试点工程上<sup>[1-15]</sup>。

已故的中国工程院资深院士吴中伟教授生前曾在其《纤维增强-水泥基材料的未来》<sup>[1-16]</sup>一文中指出:“从材料发展史来看,先民用泥结卵石、草筋泥、火山灰石灰、各种三合土,以至近代的水泥基复合材料,说明复合化是材料发展的主要途径之一……复合化的技术思路(哲学)为超叠加效应,对材料的高性能化有重要意义,可用公式表示: $1+2\geq 3$ ,不论在性能叠加与经济效益叠加上均可举出例子,材料工作者要尽量运用这一‘哲学’思想来创新”。“纤维增强在复合化中占突出地位,在(多种)高强水泥基材料中对增加韧性、抗冲击性等起着关键作用”。吴中伟教授的上述论断,使我们受到很大的启发。预期在21世纪内,通过中外学者与专家们的共同努力,不断创新,必将进一步推进纤维增强水泥基复合材料的技术进步,开发出更多的、高性能的复合材料,并进一步扩大它们的应用领域,从而为人类社会带来显著的社会效益与经济效益。

## 1.3 纤维增强水泥基复合材料的分类

纤维增强水泥基复合材料的分类,可采用以下4种方法:

### 1. 按所用纤维的类别与品种

可将纤维增强水泥基复合材料分为表1-1中所列出的5大类与若干个小类,并列举其典