

第十一届全国纤维混凝土学术会议论文集

# 纤维混凝土 的技术进展与工程应用

*Development and Utilization of Fiber Reinforced Concrete*

主编◎黄承逵 丁一宁 何化南



大连理工大学出版社







图书在版编目(CIP)数据

纤维混凝土的技术进展与工程应用:第十一届全国纤维混凝土学术会议论文集/黄承逵,丁一宁,何化南主编. —大连:大连理工大学出版社,2006.9

ISBN 7-5611-3365-0

I. 纤… II. ①黄… ②丁… ③何… III. 纤维增强混凝土—学术会议—文集 IV. TU528.572-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 111283 号

大连理工大学出版社出版

地址:大连市软件园路 80 号 邮政编码:116023

发行:0411-84708842 邮购:0411-84707961 传真:0411-84701466

E-mail:dutp@dutp.cn · URL:http://www.dutp.cn

大连理工印刷有限公司印刷 大连理工大学出版社发行

---

幅面尺寸:210mm×290mm 印张:27.75 字数:600 千字  
2006 年 9 月第 1 版 2006 年 9 月第 1 次印刷

---

责任编辑:梁 勃 责任校对:文 心  
封面设计:季 强

---

定 价:100.00 元

## 主办单位

中国土木工程学会混凝土及预应力混凝土分会  
纤维混凝土委员会

## 承办单位

大连理工大学  
深圳海川工程科技有限公司

## 协办单位(按拼音排序)

上海哈瑞克斯金属制品有限公司  
江西工程纤维科学技术研究所  
赣州大业金属纤维有限公司

## 会议学术委员会

主任 赵国藩 黄承逵  
委员 陈应波 催琦 邓宗才 丁一宁 高丹盈 郭延辉 何天淳 李庆斌  
李志业 林小松 刘卫东 卢良浩 卢亦焱 卢祖文 罗保恒 蒙云  
彭少民 石庆尧 史小兴 施仲毅 沈贵松 沈蒲生 沈荣熹 孙家瑛  
孙伟 田稳苓 王建宇 王璋水 杨松玲 姚立宁 姚武 禹琦  
谢慧才 许金余 徐蕴贤 薛伟辰 赵景海 赵顺波 张君 曾焕金  
郑建军 朱江

## 会议组织委员会

主任 丁一宁 何唯平  
委员 何化南 刘显精 刘岳鑫 彭书成 汤惠工 王伯昕 叶坚 张海文

# 前 言

这本论文集共收录在第十一届全国纤维混凝土学术会议上发表的论文68篇。内容包括：新型纤维及新型纤维混凝土的开发、研究；钢纤维混凝土、合成纤维混凝土、玻璃纤维混凝土及混杂纤维混凝土性能的深入研究，特别是与工程应用紧密相关的施工性能及耐久性的研究；各种纤维混凝土的结构性能研究；纤维混凝土的工程应用技术和实例。论文所反映的工程应用技术和创新研究对纤维混凝土技术的发展，将会起到很好的推动作用。

自1986年第一届全国纤维混凝土学术会议在大连召开以来，已经经过了整整20年时间，我们国家的纤维混凝土学术研究和工程应用技术有了突飞猛进的发展。目前各个部门共同努力做好纤维混凝土的应用，把这种先进的复合材料用到工程的关键部位，充分发挥其优良特性，为民造福，是我们的重要任务。与此同时，紧跟国际上的最新发展动态，开展新型先进纤维及其增强混凝土的研究，使纤维混凝土技术不断创新。

此次会议成功举办得力于大连理工大学、深圳海川工程科技有限公司、上海哈瑞克斯金属制品有限公司、江西工程纤维科学技术研究所、赣州大业金属纤维有限公司等有关单位的大力支持以及与会者的共同努力，在此一并表示衷心感谢！

第十一届全国纤维混凝土学术委员会主任

中国工程院院士  
大连理工大学教授

赵国藩

2006年9月

# 目 录

## 一、新型纤维及新型纤维混凝土开发

高性能特种水泥基复合材料(HPSCC)的关键技术研究 .....	姜国庆,刘小泉,孙 伟,秦鸿根(3~9)
混凝土用高强高模量聚丙烯纤维的纺丝的研究 .....	卞荣兵,沈 健(10~15)
水泥基工程复合材料(ECC)的研究与应用 .....	田 砾,许婷华,万小梅,赵铁军(16~20)
PVA-ECC 的弯曲韧性 .....	赵铁军,毛新奇,田 砾(21~26)
高韧性纤维增强水泥基复合材料单轴抗拉性能研究 .....	张 君,公成旭(27~32)
Ultrafiber <sub>TM</sub> -500 纤维增强混凝土基本性能研究 .....	陈世鸣,张永明,刘国平(33~36)
玄武岩连续纤维混凝土动力性能的试验研究 .....	林智荣 姚立宁,施 斌,何军拥(37~41)
玄武岩纤维及其增强混凝土力学性能研究与应用 .....	吴 刚,胡显奇,蒋剑彪,张 敏(42~47)
活性粉末混凝土研究与应用进展 .....	闫光杰,刘培文(48~53)
柔性玄武岩纤维混凝土波动耗散研究 .....	姚立宁,施 斌,郭仁俊,何军拥,林智荣,韩文博,吴永明(54~59)
羧基丁苯增强钢纤维混凝土的力学性能和微观结构 .....	李庚英,容随强,王 湛(60~65)

## 二、纤维混凝土性能研究的进展

高温后钢纤维高性能混凝土力学性能试验研究 .....	董香军,丁一宁(69~75)
高温后钢纤维高强混凝土力学性能试验研究 .....	赵 军,张 明,高丹盈(76~79)
高温后聚丙烯纤维高强混凝土力学性能试验研究 .....	赵 军,邱计划,高丹盈(80~83)
钢纤维混凝土力学性能的试件尺寸效应系数 .....	杜 晖,钱晓军,赵顺波(84~90)
低掺量钢纤维对普通混凝土的强度与弯曲韧性的影响 .....	时冬冬,刘岳鑫,尹机会,丁一宁(91~95)
PVA 纤维水泥基复合材料轴向拉伸应力—应变全曲线试验研究 .....	黄 俊,姜弘道(96~103)
离心成型钢纤维混凝土的抗拉强度试验研究 .....	张吉红,李凤兰,张燕燕(104~108)
纤维对自密实混凝土工作度和早龄期收缩性能影响的试验研究 .....	刘思国,刘岳鑫,丁一宁(109~116)
不同纤维对高性能混凝土自由收缩和非自由收缩影响的试验研究 .....	马晓华,丁一宁(117~122)
大掺量钢纤维混凝土流动性研究 .....	张松榆,李学英,金晓鸥(123~129)
粗合成纤维混凝土抗氯离子腐蚀性试验研究 .....	李建辉,邓宗才,王璋水(130~134)

粗合成纤维混凝土抗裂与抗冲击性能试验研究 .....	王伯昕,黄承逵(135~141)
聚丙烯纤维混凝土正交试验研究 .....	霍俊芳,申向东,曹喜(142~147)
混杂纤维高强混凝土单轴受压时力学性能的试验研究 .....	尹机会,刘岳鑫,时冬冬(148~151)
混杂纤维混凝土抗裂及抗渗性能试验研究 .....	赵晶,蔡新华,王伟哲,江阿兰(152~157)
评定 FRC 材料性能的静定圆板试验方法及有限元分析 .....	谷倩,Hanfeng Xu,Sidney Mindess,彭少民(158~163)
玻璃纤维及混杂纤维高性能混凝土早龄期抗裂性能研究 .....	康晶,丁一宁(164~170)
改性聚丙烯纤维混凝土力学性能的研究 .....	李学英,张赛镭,赵晶,马新伟(171~174)
钢纤维自密实混凝土劈拉性能 .....	朱海堂,高丹盈,蔡怀森,张启明(175~180)
钢纤维自密实混凝土弯曲性能 .....	高丹盈,韩鞠红,蔡怀森,胡良明(181~186)
钢纤维对混凝土结构裂缝的控制及其计算 .....	吴斌(187~194)

### 三、连续纤维增强混凝土

FRP 桥面板工程应用进展 .....	薛伟辰,张蜀沪(197~202)
GFRP 筋加强混凝土梁正截面承载力的试验研究 .....	马文义,李志业,唐协,李明(203~207)
碳纤维布加固受损混凝土梁裂缝的试验研究 .....	张大鹏,黄承逵(208~211)
FRP 加固混凝土柱轴向受压承载力分析 .....	张大鹏,黄承逵(212~215)
碳纤维布加固砖墙试验与计算分析 .....	谷倩,杨翌,彭少民(216~223)
GFRP 锚杆在公路边坡支护工程中的应用研究与经济性评价 .....	李明,曹阳,何唯平,黄生文(224~232)

### 四、纤维混凝土的结构性能

纤维增强混凝土极限变形控制超长混凝土墙及地基板的临界长度比较分析 .....	陈世鸣,马鹰,刘国平(235~239)
钢筋钢纤维混凝土梁的弯曲延性试验研究 .....	张宏战,林涛,黄承逵(240~246)
钢筋混凝土六桩承台试验研究 .....	张元元,李继祥,杨双双,朱向阳,彭少民(247~252)
钢纤维混凝土工业地坪数值分析 .....	王健,黄承逵(253~259)
UHPCC 工字型预应力无腹筋梁斜裂荷载分析 .....	吴香国,韩相默(260~266)
F. C. 的 T 形梁抗弯承载力试验研究 .....	朱江,李士恩,谢灵武(267~271)
连续刚构梁 C60 纤维混凝土抗裂性研究 .....	秦鸿根,孙伟,慕儒,曹鹏飞,刘小泉(272~277)
掺聚丙烯纤维抑制混凝土板干缩裂缝的实验研究 .....	余书超,邢海锋,郑洲,吴均,石磊,夏多田,李刚,陆红梅(278~283)

层布式纤维混凝土弯拉性能试验研究 .....	范小春,卢哲安,陈应波(284~289)
层布钢纤维和合成纤维组合增强混凝土的试验研究 .....	王璋水,邓宗才(290~296)
不同纤维掺量沥青混凝土的抗疲劳特性研究 .....	郭乃胜,赵颖华(297~302)
纤维对沥青混合料路用性能影响研究 .....	孙家瑛,任传军,戴亚英(303~307)
钢纤维沥青混合料路面性能及应用研究 .....	杨锡武,徐基立,杨 轶(308~314)
钢筋钢纤维混凝土短梁刚度试验研究 .....	高丹盈,袁 媛,赵 军,杨满香(315~320)
钢纤维混凝土与老混凝土粘结劈拉强度 .....	程红强,高丹盈,冯 虎(321~326)
钢纤维局部增强高强混凝土板冲切承载力 .....	谢晓鹏,高丹盈,杨文涛,赵广田(327~332)
大坝钢衬钢纤维自应力混凝土压力管道裂缝试验研究及其计算方法 .....	何化南,张 涛,黄承远(333~340)

## 五、纤维混凝土应用技术和实例

纤维混凝土在插入式大圆筒结构中的应用 .....	刘亚平(343~349)
大型无拉线预应力钢纤维混凝土单叉梁门型杆塔的工程应用 .....	赵顺波,韩文德,张天光(350~357)
纤维混凝土盾构管片安全性评价 .....	张成满,李志业,崔 强(358~362)
钢纤维混凝土在小型水库除险加固中的应用 .....	童敏娟,施广宏(363~366)
纤维混凝土在电力工程中的应用 .....	周建红,廖武华(367~370)
跨海大桥混凝土抗裂技术措施研究 .....	孙家瑛(371~378)
索塔锚固区泵送钢纤维混凝土的研究 .....	孙 伟,蒋金洋,陶建飞,张云升,秦鸿根,王 晶(379~387)
钢纤维混凝土电杆的离心成型工艺 .....	赵顺波,张 波,李晓克,高润东(388~395)
掺入钢纤维增强轻骨料墙板 .....	周大伟,黄丽华,顾荣才(396~399)
硼泥陶粒纤维混凝土外墙板的研制 .....	聂立武,周大伟,韩古月,李思盛,王 彪(400~404)
机场道面混凝土腐蚀原因及防治方法的探讨 .....	彭书成,邓可库(405~410)
凯泰(CTA)改性聚丙烯粗纤维在混凝土中的应用研究 .....	金 剑,刘丽君,史小兴(411~416)
GRC 外墙制品预混喷射成型工艺的开发与应用 .....	崔 琪,崔玉忠(417~434)



摘要: 本文介绍了高性能纤维混凝土(HPC)的组成、性能、应用及发展趋势。HPC是一种由高强度水泥基体、细骨料、外加剂和纤维组成的复合材料。它具有高强度、高韧性、抗裂性能好等优点。HPC广泛应用于桥梁、隧道、高层建筑等领域。随着材料科学的进步, HPC的研究和应用将越来越广泛。

关键词: 高性能纤维混凝土; 特种混凝土(SPC); 纤维; 混凝土

## 一、新型纤维及新型纤维混凝土开发

Abstract: This paper introduces the composition, performance, application and development trend of high performance fiber concrete (HPC). HPC is a composite material composed of high strength cement matrix, fine aggregate, admixtures and fibers. It has the advantages of high strength, high toughness, and good crack resistance. HPC is widely used in bridges, tunnels, high-rise buildings and other fields. With the progress of material science, the research and application of HPC will become increasingly widespread.

Key Word: High performance fiber concrete; Special concrete (SPC); Fiber; Concrete

### 前言

近年来混凝土工程在国民经济中占有越来越重要的地位,混凝土工程的发展水平已成为衡量一个国家综合国力的重要标志。普通混凝土或钢筋混凝土在工程应用中存在着许多缺陷,如脆性大、抗裂性能差、抗冲击性能低等。为了克服这些缺陷,人们开始研究新型纤维混凝土。

在国外,纤维混凝土(FRC)的研究始于20世纪50年代。最初,人们将纤维加入混凝土中,以提高其抗裂性能。随着研究的深入,人们发现纤维还可以提高混凝土的韧性、抗冲击性能和抗疲劳性能。目前,纤维混凝土的研究已经取得了长足的进步。纤维混凝土的种类繁多,如玻璃纤维增强混凝土(GFRC)、碳纤维增强混凝土(CFRP)、芳纶纤维增强混凝土(AFRP)等。其中,碳纤维增强混凝土(CFRP)具有强度高、模量大、耐腐蚀等优点,广泛应用于桥梁、隧道、高层建筑等领域。芳纶纤维增强混凝土(AFRP)具有强度高、韧性好、抗冲击性能强等优点,广泛应用于防弹装甲、航空航天等领域。玻璃纤维增强混凝土(GFRC)具有强度高、耐腐蚀、易施工等优点,广泛应用于建筑、工业等领域。

ECC这种新型纤维混凝土,是在普通混凝土的基础上,加入适量的纤维和外加剂,通过特殊的工艺制备而成。它具有高强度、高韧性、抗裂性能好等优点。ECC的研究和应用已经取得了长足的进步。目前,国内外已经开展了大量的ECC研究,并取得了一系列研究成果。ECC的研究和应用,为混凝土工程的发展提供了新的思路和方法。

ECC就是在这样的背景下产生的。它是在普通混凝土的基础上,加入适量的纤维和外加剂,通过特殊的工艺制备而成。它具有高强度、高韧性、抗裂性能好等优点。ECC的研究和应用已经取得了长足的进步。目前,国内外已经开展了大量的ECC研究,并取得了一系列研究成果。ECC的研究和应用,为混凝土工程的发展提供了新的思路和方法。

文开士鄧鼎舉平聖祿姪舉平聖祿

# 高性能特种水泥基复合材料 (HPSCC) 的关键技术研究

姜国庆, 刘小泉, 孙伟, 秦鸿根

(东南大学材料学院, 210096 南京)

**摘要:** 本研究采用多重复合技术, 制备出具有高性能特种水泥基复合材料 (HPSCC), 深入分析了该材料的关键技术、性能和重要优势, 为高性能水泥基复合材料的发展提供了新思路、新方法和新技术。

**关键词:** 特种水泥基复合材料; 多重复合技术; 高延性; 多缝开裂

## The experimental research on the pivotal technique of high performance special cementitious composites (HPSCC)

**Abstract:** The multiple-compound technology is used in this paper. The High Performance Special Cementitious Composites (HPSCC) is prepared. The pivotal technique, performance and advantages of this material is also analysed. It can provide new approach, new method and new technology for the development of high performance cementitious composites.

**Key Words:** Special Cementitious Composites; multiple-compound technology; high ductility; multiple-cracking

## 0 前言

近年来混凝土工程特别是桥梁、抗震构造物对阻裂、限裂的要求越来越高, 而目前广泛应用的 structural material—普通混凝土或聚丙烯纤维增强混凝土并不能满足这种需要, 故对于具有高延性、高韧性、高阻裂、高流动的新型高性能水泥基复合材料的制备技术与基础理论研究显得迫在眉睫。

在国外, V.C Li<sup>[1]</sup>于 1992 年最先开始工程水泥基复合材料 (Engineered Cementitious Composite 简称 ECC) 的理论研究, 最早是用聚乙烯纤维 (Polyethylene, 简称 PE) 来试图解决水泥基复合材料的增强、增韧问题, 1997 年 Li 和 Kanda<sup>[2]</sup>等开始将聚乙烯醇 (Polyvinyl Alcohol, 简称 PVA) 纤维用于 ECC, 制成了 PVA 纤维增强水泥基复合材料, 随后“工程水泥基复合材料”作为一种新的高性能水泥基复合材料进入该领域研究者的视野, ECC 因除去了粗集料增加了结构的均匀性, 并用粒径为 100~200 μm 的磨细石英砂作为集料来制备 ECC, 其关键的制备技术对纤维及外加剂都有着特别苛刻的要求, 故其昂贵的成本和工艺的复杂性令工程领域望而却步, 近十年的历程, 也仅能限于小范围的试验或局部尝试, 推广应用受到很大的制约, 反过来更约束了 ECC 的理论发展。

ECC 这种新型水泥基复合材料在日本有几个工程应用的报道, 目前国内还只是停留在对 ECC 的特点、发展过程做一些简要介绍, 而对具有高延性、高韧性、高阻裂、高流动的高性能特种水泥基复合材料 (High Performance Special Cementitious Composites 简称 HPSCC) 的制备技术与基础理论的研究工作基本处于空白, 更没有工程应用的报道。

ECC 就其存在的问题主要表现在:

作者简介: 姜国庆(1968-), 男, 东南大学材料学院, 在职博士。



(1) 制作成本异常昂贵, 原材料的选用、加工受到很大的限制, 故仅能限于小范围的试验或局部尝试, 一定程度上影响了其推广应用, 更约束了 ECC 的理论发展。

(2) 制备技术异常难于掌控, 可操作性不好, 更谈不上制定相应的设计和测试标准。

(3) ECC 的关键性能还没得到系统的研究, 微观机理更有待深入探讨。

## 1 主要技术途径

### 1.1 高性能特种水泥基复合材料 (HPSCC) 的研究重点

(1) 采用纤维型与颗粒型多重复合, 从细观的角度来把握原材料的种类、尺度及相互配合, 使制备技术得到深层次的突破, 更具有普遍意义。

(2) 找出高延性、高韧性、高阻裂等关键性能与微细裂缝形成发展、弹性恢复能力之间的相关性, 提出多缝开裂、弹性恢复与材性、制备之间的控制模型。

### 1.2 原材料

水泥(C): 中国水泥厂 P.O42.5;

粉煤灰(Fa): 南京华能 I 级粉煤灰;

砂(S): 采用 3mm 以下的洁净天然河砂;

外加剂: 聚羧酸系 PCA, 博特公司;

纤维: 一种为日本 Kuraray 公司生产, 记为 F-PVA; 另一种为兰州康英公司生产, 记为 H-PVA; 其性能见表 1。

表 1 两种纤维材性

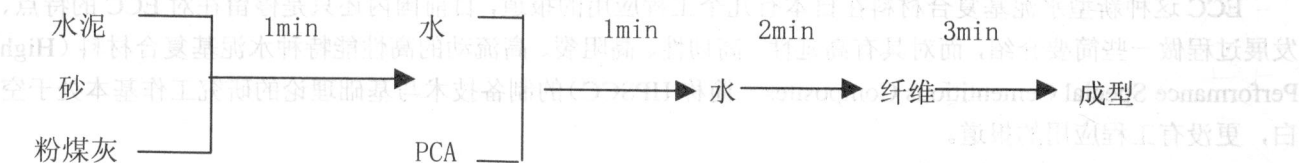
纤维编号	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	长度 (mm)	直径 (μm)	抗拉强度 (MPa)	杨氏模量 (GPa)
F-PVA	1.3	12	39	1600	40
H-PVA	1.3	6	12	1200	30

### 1.3 配合比设计

表 2 基准配合比

水泥	水	砂	粉煤灰	外加剂	纤维
1.0	0.51	0.8	1.2	0.01	0.02

制备工艺:



## 1.4 试样的制备

按照 GB177-85《水泥胶砂强度检验方法》和 GB/T 15231.3-94 关于玻璃纤维增强水泥性能试验方法抗弯性能，制备试件  $40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 160\text{mm}$  和  $10\text{mm} \times 60\text{mm} \times 225\text{mm}$  的试件。试件标号为：X-Y-Z，X 代表纤维种类（K—空白，F—进口，H—国产），Y 代表试件水灰比，Z 代表纤维掺量。如图 1 和图 2 所示。

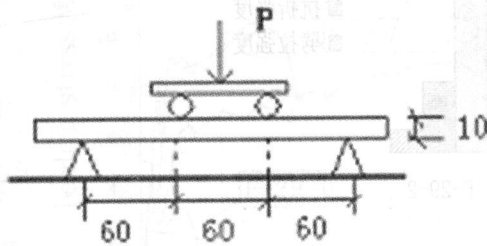


图 1 弯折试验简图

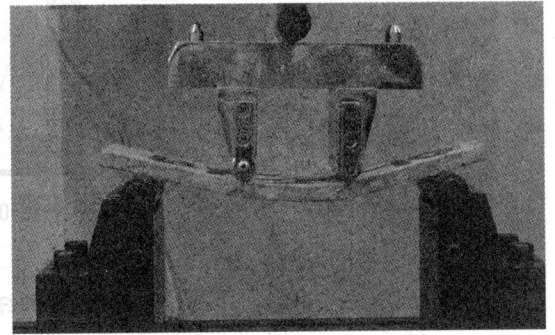


图 2 薄板延性试验图

## 2 试验结果与分析

### 2.1 流动性与纤维掺量的关系（如图 3）

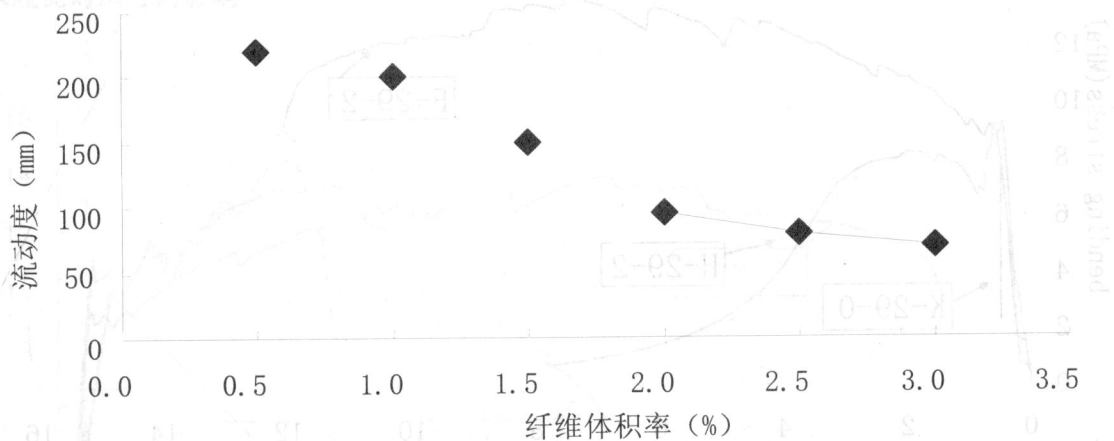


图 3 纤维掺量与流动度的关系

现象与分析：由图 3 可看出，总体趋势是流动性随纤维掺量加大而不断降低，在 0.5%~1.0% 范围内流动性基本上在  $200 \times 200\text{mm}$ ，而掺量增至 3.0% 时流动性极低，且有纤维结团的现象，并有明显的泌水现象，可以认为：PVA 纤维掺量在 2.0% 以下，经过配合比调整还是可以满足必要的流动性要求，超过这个限值则无法满足必要的工作性能。

### 2.2 力学性能试验结果

本文对不同纤维掺量、不同水胶比、不同龄期试件进行了比较。其试验结果及其分析如下。

### 2.2.1 不同纤维掺量抗压强度、劈拉强度及抗折强度对比 (如图4)

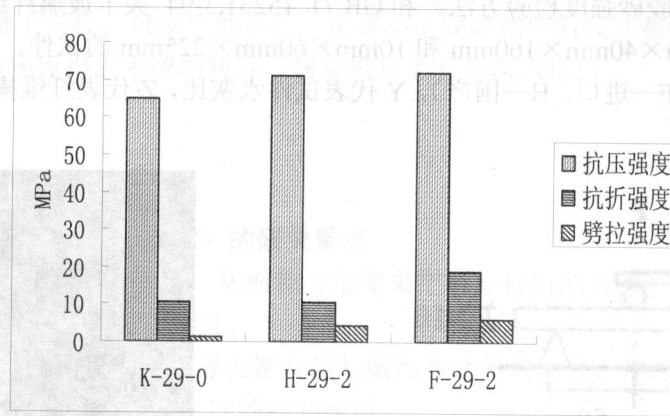


图4 不同纤维品种对力学性能的影响对比

分析: 加入纤维后与空白样比较, 抗压强度略有增长; 对比 K-29-0 试件, H-29-2 劈拉强度增加了 2 倍, F-29-2 劈拉强度增加了 3 倍。

### 2.2.2 不同纤维试件弯曲强度与挠度对比

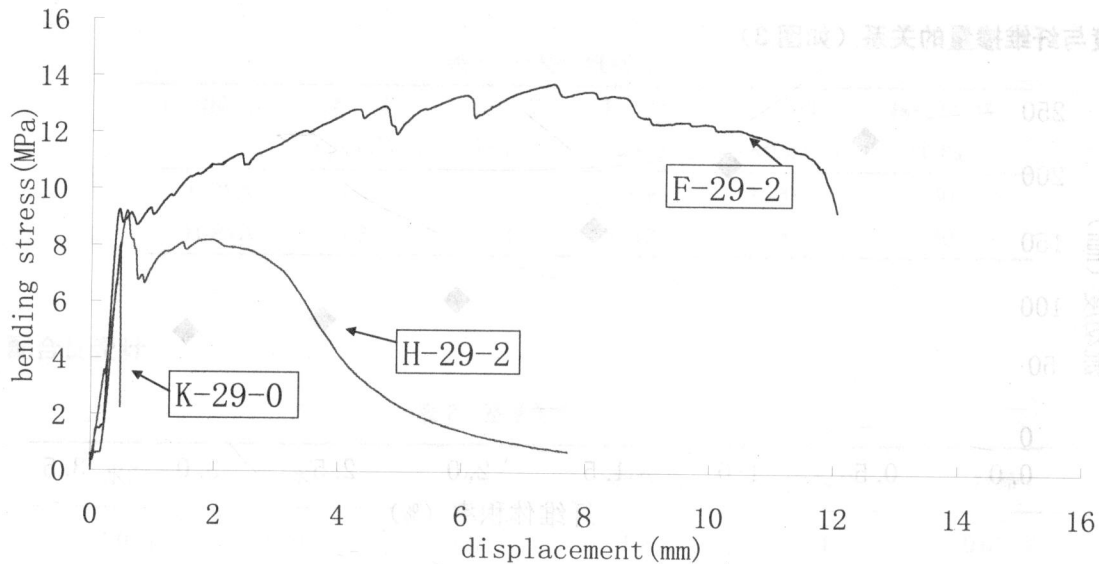


图5 不同纤维的弯曲强度与挠度曲线对比图

分析: 从图5看出, K-29-0 没有延性发展的阶段, 而 F-29-2 进口纤维样有很明显的延性发展过程, 且该过程明显长于 H-29-2 国产纤维样, 在挠度达到 8~12mm 试件不断产生微细裂缝, 而继发裂缝在外力作用下保持微小的发展。

初裂强度 F-29-2、H-29-2 均比 K-29-0 空白样有较大的提高, 均比空白样增长了 14%。



## 2.2.3 不同纤维掺量的弯曲强度与挠度曲线对比

蔡开松等干关 8.8

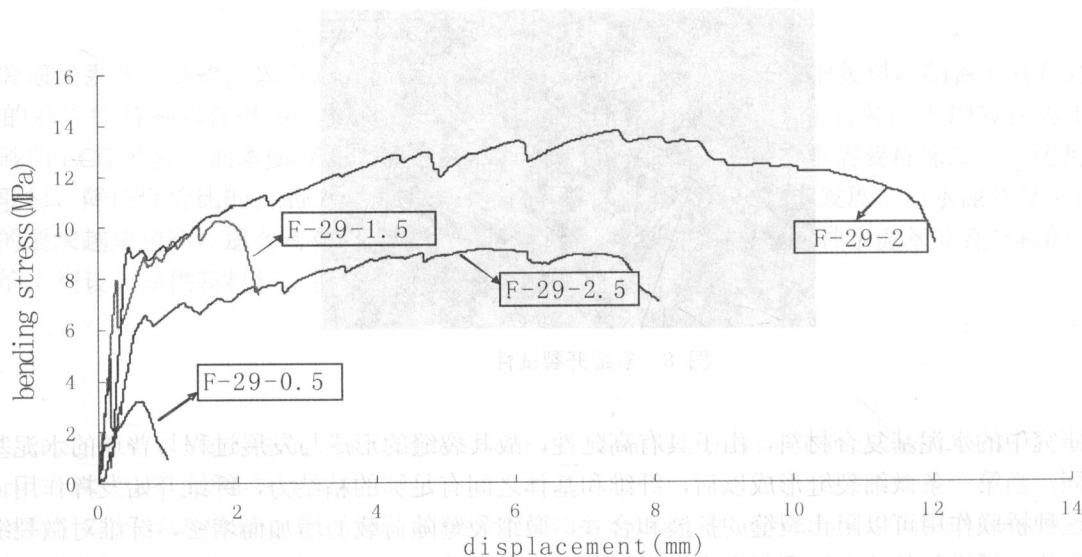


图6 不同纤维掺量的弯曲强度与挠度曲线对比图

分析：从图6看出，当掺入量从0.5%增至1.5%时，开始出现应变硬化，但还不明显，而掺入2%的试件应变硬化过程最为明显，其表现出的延性最佳，相比而言掺量为2.5%的试件其延性反而不是最佳。

## 2.2.4 水胶比对延性的影响

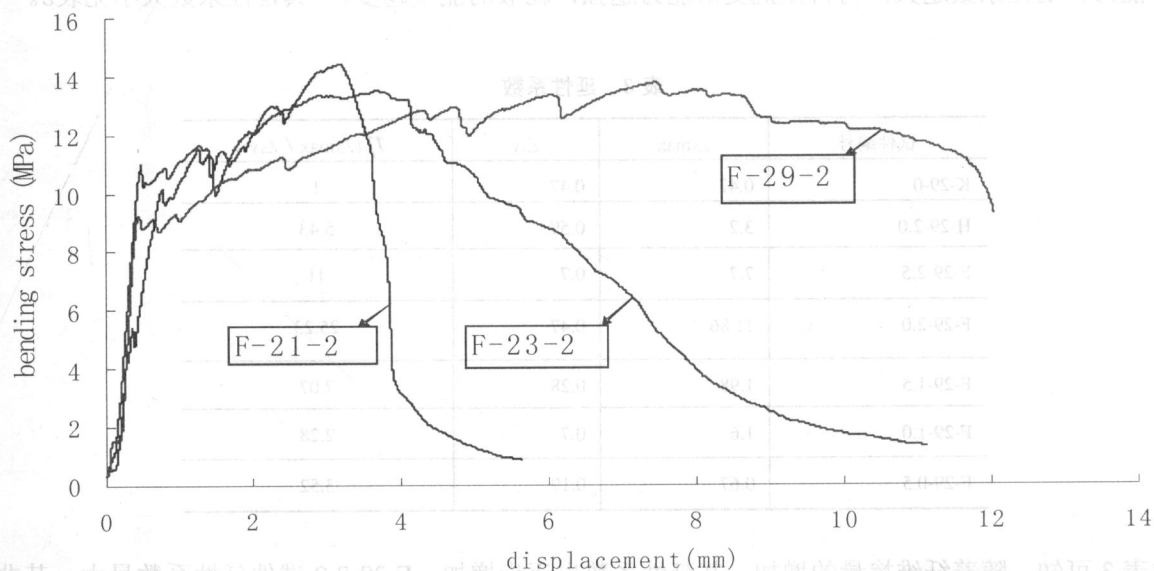


图7 不同水胶比荷载挠度曲线对比图

分析：从图7可以看出减小水胶比对复合材料的弯曲强度具有一些提高的作用，但结果显示，低水胶比却带来延性下降，提高水胶比至0.29时，复合材料表现出极佳的延性，应变硬化过程长。

### 2.3 关于多缝开裂

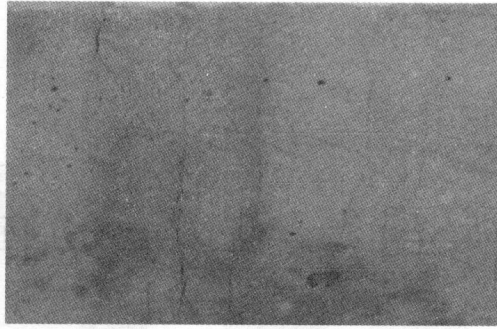


图 8 多缝开裂试件

本研究中的水泥基复合材料,由于具有高延性,故其裂缝的形成与发展过程与普通的水泥基复合材料有所不同,当第一条微细裂缝形成以后,纤维和基体之间有足够的粘结力,纤维开始发挥作用,产生桥联应力,这种桥联作用可以阻止裂缝的扩展和合并,微细裂缝随荷载的增加而增密,纤维对微裂缝的桥联引起应变硬化,纤维与基体之间不断产生微量滑移,这种滑移正是耗散大量能量的根源,而不像普通的水泥基复合材料完全靠基体与纤维的界面粘结来提高材料的延性,那么普通的水泥基复合材料纤维就不是拔出而是断裂的过程。

### 3 试验结果分析

对于具有高延性的 HPSCC,本文采用延性系数 $\eta$ 对其性能进行了评定:

延性系数 $\eta$ :是指材料允许的极限变形 $\Delta_{\max}$ 与屈服变形 $\Delta_y$ 之比<sup>[3]</sup>。延性系数可用来衡量材料抵抗变形能力。延性系数越大,材料抵抗变形能力越强,耗散的能量越多。其延性系数大小见表3。

表 3 延性系数

试件编号	$\Delta_{\max}$	$\Delta_y$	$\eta (\Delta_{\max} / \Delta_y)$
K-29-0	0.47	0.47	1
H-29-2.0	3.2	0.59	5.43
F-29-2.5	7.7	0.7	11
F-29-2.0	11.86	0.47	25.23
F-29-1.5	1.98	0.28	7.07
F-29-1.0	1.6	0.7	2.28
F-29-0.5	0.67	0.19	3.52

由表 3 可知,随着纤维掺量的增加,其延性系数也逐步增加。F-29-2.0 试件延性系数最大,其非弹性变形能力也最大,是不加纤维试件 K-29-0 的 25 倍,能量耗散能力最强, F-29-2.0 试件出现较为规则的多缝开裂现象。H-29-2.0 试件中纤维长度只有 6mm,其分散性能也不如 REC-15 纤维,有结团现象,且大部分纤维是拔断破坏,所以其增韧效果不如 REC-15 纤维。本文通过掺大量粉煤灰,使尽可能多的纤维是拔出破坏而不是拔断破坏,从而使复合材料产生大量微细裂缝的多缝开裂具有很大的延性和能量吸收能力。

## 4 结语

本研究通过系统的试验, 采用最大粒径为 3mm 连续级配的天然砂作为细集料, 制备出具有高延性、多缝开裂的高性能特种水泥基复合材料, 所取得的部分指标完全达到国外的采用平均粒径为 100 μm 磨细石英砂的 ECC 性能, 而本研究的制备方法、技术更易于掌控, 细集料不需要特殊加工, 达到节省能耗、易于取材、降低性价比的目的。随着工程日益向超大跨、超高度等方向发展, 对水泥基复合材料的阻裂、限裂的要求越来越高, 那么具有高延性、良好弹性恢复能力的高性能特种水泥基复合材料的研制与应用, 将会给工程设计提供新材料、新技术、新理论。

### 参考文献:

- [1] Li V C, Leung C K Y. Steady State and Multiple Cracking of Short Random Fiber Composites[J].ASCEJ. of Engineering Mechanics, 1992.118(11):2246-2264
- [2] Kanda T, Li V C. Interface Property and Apparent Strength of High-Strength Hydrophilic Fiber in Cement Matrix [ J ].of Materials in Civil Engineering, ASCE, Feb, 1998, 10( 1 ):5-13
- [3] 徐绩青. 延性系数确定方法的探讨[J].水运工程, 2004, (9): 14-17