

文章编号:1671-6833(2009)01-0092-04

PVA 纤维水泥基复合材料的抗拉性能及韧性研究

薛会青, 邓宗才, 李建辉

(北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124)

摘 要: 聚乙烯醇(PVA)纤维是一种具有高抗拉、高弹模, 亲水性好, 特别是与波特兰水泥有良好的相容性等特点的新型纤维. 为配制出高韧性、大变形纤维增强水泥基复合材料, 试验介绍了 PVA 纤维增强水泥基复合材料的单轴拉伸性能和弯曲韧性, 试验结果表明: PVA 纤维具有良好的阻裂增韧效用, 能够显著提高水泥基复合材料的抗裂性能和变形能力; PVA 纤维可明显改善混凝土弯曲韧性, 且 PVA 纤维混凝土的弯曲韧性指数明显高于聚丙烯(PP)纤维混凝土.

关键词: 单轴拉伸; 弯曲韧性; 抗裂性能

中图分类号: TU 528 文献标识码: A

0 引言

聚乙烯醇(PVA)纤维具有高强度、高弹模, 且与水泥基体的粘结强度非常高的特点, 它不但能提高混凝土早期阻裂性能, 而且可以提高混凝土的弯曲韧性及抗冲击性能, 同时改善混凝土的抗渗性、抗冻性、抗疲劳性能、耐磨性能, 从而提高混凝土结构耐久性. 故对具有高抗裂、高韧性、高变形性能的 PVA 纤维增强水泥基复合材料(ECC)的制备技术及理论研究具有重要的工程价值和学术意义<sup>[1-3]</sup>.

目前关于 ECC 单轴直接拉伸试验和 PVA 纤维混凝土韧性的研究很少, 作者用单轴拉伸试验测得了 PVA-ECC 应力-应变全过程曲线及其主要的力学性能指标, 并研究了不同 PVA 纤维掺量混凝土的弯曲韧性和弯曲变形性能, 且与聚丙烯(PP)纤维混凝土进行了比较.

1 试验材料与配比

聚乙烯醇(PVA)纤维由日本尤尼吉可贸易有限公司提供, 纤维性能指标见表 1.

1.1 单轴拉伸试验

水泥为 P. O. 42.5 水泥, 砂为标准石英砂, PVA 纤维质量掺量分别为 4 kg/m<sup>3</sup>、5 kg/m<sup>3</sup> 和 6 kg/m<sup>3</sup>, 减水剂为羧酸类, 配合比详见表 2.

1.2 弯曲韧性试验

水泥为 P. O. 42.5 水泥, II 级粉煤灰, 大石子

为碎石, 河沙属中砂, 小石子取北京当地的瓜子片, 配合比详见表 3.

表 1 纤维特性  
Tab. 1 The properties of fiber

名称	直径/ μm	长度/ mm	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	抗拉强 度/MPa	弹性模 量/GPa	极限伸 长率/%
PVA 纤维	39	12	1.2	1 620	42.8	6

表 2 材料配合比  
Tab. 2 Mix proportions of materials

名称	纤维质 量掺量 (kg·m <sup>-3</sup> )/%	纤维体 积掺量 (kg·m <sup>-3</sup> )/%	水泥 /(kg· m <sup>-3</sup> )	石英砂 /(kg· m <sup>-3</sup> )	水 /(kg· m <sup>-3</sup> )	减水剂 /(kg· m <sup>-3</sup> )
PV1	4	0.308	650	509	228	4.875
PV2	5	0.385	650	509	228	4.875
PV3	6	0.462	650	509	228	4.875

2 试验方法

2.1 单轴拉伸试验

单轴拉伸试验采用 12 mm×40 mm×160 mm 试块. 试件成型 24 h 后拆模, 放入标准养护室养护 28 d, 试验前 3 h 拿出试件晾干准备试验. 每种纤维掺量的配合比完成 3 个试件的拉伸试验.

收稿日期: 2008-09-15; 修订日期: 2008-10-30

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目(8082002)

作者简介: 薛会青(1981-), 女, 山东人, 博士研究生, 主要从事纤维水泥基复合材料方面的研究工作. E-mail: xuehuiqing2006@emails.bjut.edu.cn

表 3 材料配合比  
Tab. 3 Mix proportions of materials

kg · m <sup>-3</sup>								
纤维		水泥	砂子	粉煤 灰	大石 子	小石 子	水	减水 剂
名称	质量 掺量							
PV4	4	380	575	100	702	468	160	4.8
PV5	5	380	575	100	702	468	160	4.8
PV6	6	380	575	100	702	468	160	4.8

试验用美国 MTS810 材料试验机,计算机采集位移、应变和承载力,应变由试件两面标距为 50 mm 的引伸计测定.为防止试件上下加压端因局部受压而破坏,加载前在试件的两侧粘上 50 mm × 40 mm × 1 mm 的铝板,粘接 6 h 后进行试验.

2.2 弯曲韧性试验

弯曲韧性试验采用 100 mm × 100 mm × 400 mm 试块.试件成型 24 h 后拆模,放入标准养护室养护 28 d,试验前 3 h 拿出试件晾干准备试验.每种纤维掺量的配合比完成 3 个试件的韧性试验.

按照美国 ASTM 方法,用三分点梁进行韧性试验,梁跨度为 300 mm.试验在 Instron1343 伺服系统机上进行,加载按恒位移控制.为了提高梁挠度测试的精度,在挠度记录中不包括在支座处的沉降、加载点的位移及钢板与试件间的缝隙和钢板的弹性变形等.梁挠度的测定采用日本 YOKE 方法<sup>[1]</sup>.将夹式引伸仪置于试件的中性轴测定梁的挠度,位移速率 0.1 mm/min,计算机自动采集数据,得到纤维混凝土荷载 - 挠度曲线.

3 试验结果分析

3.1 单轴拉伸试验

3.1.1 轴拉应力 - 应变全曲线特征

PVA - ECC 典型的抗拉应力 - 应变全曲线如图 1 所示,图中  $\sigma$  和  $\varepsilon$  分别为拉伸应力与应变.

由图 1 可见,普通混凝土(C)和聚丙烯纤维混凝土(PP)在达到抗拉强度后,应力 - 应变曲线急剧下降,构件迅速失去承载力,基本上都是单裂纹破坏<sup>[3]</sup>;而 PV1、PV2 和 PV3 的最大拉应变远远高于基体峰值应变.随着应变的增加应力持续上升,这是由于裂纹附近的 PVA 纤维分子链中有很多羟基,与周围水泥基材料之间的化学胶结作用非常强,纤维在未超过其极限抗拉强度前产生桥联应力,这种桥联作用将阻止裂缝的扩展与合

并,微细裂缝随着荷载的增加而加密,纤维对微细裂缝的桥联引起应变硬化,纤维与基体不断产生微量滑移,这种微量滑移可吸收大量能量,而不是完全依靠纤维与基体的界面粘结来提高复合材料的延性<sup>[4~11]</sup>.ECC 实现了应变硬化和多重裂纹开裂.在出现第一条可视裂纹后,PV3 比 PV2、PV1 的下降段相对缓慢一些,表明 PV3 的阻裂增韧效用优于 PV2、PV1.

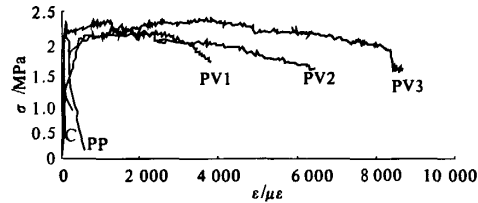


图 1 PVA - ECC 的  $\sigma - \varepsilon$  全曲线

Fig. 1 Tensile stress - strain ( $\sigma - \varepsilon$ ) curves for PVA - ECC

3.1.2 单轴拉伸力学指标

由 ECC 单轴拉伸曲线获得的拉伸力学指标平均值列于表 4,表中  $f_{cr}$  为开裂强度,  $f_t$  为抗拉强度,  $\varepsilon_u$  为试验结束时测得的最大拉应变,  $E_t$  为弹性模量,  $G_f$  为断裂能,  $L_{ch}$  为特征长度.

表 4 PVA - ECC 的单轴拉伸力学指标

Tab. 4 Uniaxial tensile mechanical performance index for PVA - ECC

编号	$f_{cr}/$ MPa	$f_t/$ MPa	$\varepsilon_u/$ $\mu\varepsilon$	$E_t/$ GPa	$G_f/$ ( $N \cdot m^{-1}$ )	$L_{ch}/$ mm
PV1	1.75	2.32	3 800	19.56	386.81	1 405.69
PV2	1.85	2.35	6 482	20.44	587.02	2 172.69
PV3	2.05	2.38	8 657	22.19	883.69	3 461.81

由表 4 可知,PV3 的开裂强度比 PV2、PV1 分别提高 11% 和 17%,PV3 的抗拉强度比 PV2、PV1 分别提高 1% 和 3%,PV3 的弹性模量比 PV2、PV1 分别提高 9% 和 13%.表明随着 PVA 纤维质量掺量的增加,PVA - ECC 的开裂强度,抗拉强度和弹性模量逐渐增加.

PV3 的最大拉应变比 PV2、PV1 分别提高 34% 和 128%.表明随着 PVA 纤维掺量增加,PVA - ECC 的最大拉应变显著提高,说明纤维掺量对最大拉应变影响大. PVA - ECC 复合材料的最大拉应变是聚丙烯纤维混凝土(170  $\mu\varepsilon$ ) 的 20 ~ 50 倍<sup>[5]</sup>. PVA - ECC 复合材料的变形能力显著高于聚丙烯纤维混凝土,具有高韧性和大变形的特点. PVA 纤维使水泥基复合材料的变形能力大幅度提高,裂缝宽度显著变小,说明 PVA 纤维具有良

好的阻裂增韧和多裂纹扩展性能,提高了水泥基复合材料的抗裂性能和变形能力。

### 3.1.2.1 裂缝扩展宽度与轴拉应力的关系

PVA-ECC 在拉伸过程中的总变形量  $\delta$  为

$$\delta = \delta_e + \delta_o + w \quad (1)$$

式中:  $w$  是裂缝扩展宽度,  $\delta_e$  及  $\delta_o$  分别为变形曲线上的断裂区以外的弹性变形及剩余变形, 且有

$$\delta_e = \sigma l / E_t, \delta_o = \sigma_p l / E_t \quad (2)$$

$$\delta_o = \delta_p - \delta_e \quad (3)$$

式中:  $\sigma$  是轴拉应力,  $\sigma_p$  是峰值应力,  $\delta_p$  和  $\delta_e$  分别是峰值应力对应的总变形和弹性变形,  $E_t$  是弹性模量,  $l$  是试件标距。

裂缝扩展宽度  $w$  与试件长度无关, 在最大荷载值以前无宏观裂缝, 裂缝扩展宽度为

$$w = \delta - \delta_e - \delta_o \quad (4)$$

用式(4)可求得裂缝宽度, 裂缝宽度与其相对轴拉应力的试验曲线如图2所示。

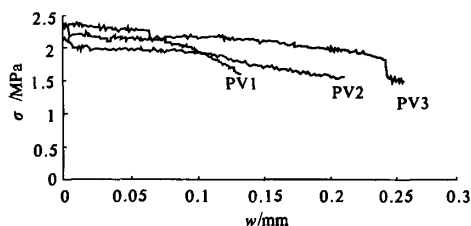


图2 PVA-ECC 的轴拉应力  $\sigma$  与裂缝宽度  $w$  的关系曲线

Fig.2 Tensile stress-crack width ( $\sigma-w$ ) curve for PVA-ECC

### 3.1.2.2 断裂能

断裂能  $G_F$  是形成单位面积裂缝所消耗的能量, 即应力-裂缝宽度曲线下的面积, 即

$$G_F = \int_0^w \sigma(w) dw \quad (5)$$

断裂能计算结果列于表4, PV3 的断裂能比 PV1 提高 128%, 表明随着纤维掺量增加, ECC 的断裂能逐渐增加。

断裂能值较充分地反映了 PVA-ECC 在断裂过程中消耗的能量。断裂能愈大, 表明 PVA-ECC 在断裂过程中消耗的能量愈大, 纤维的阻裂效果愈显著。普通混凝土和聚丙烯纤维混凝土的断裂能平均值分别是 140 N/m 和 200 N/m<sup>[5]</sup>, ECC 的断裂能介于 386 N/m 到 883 N/m 之间, 由于 ECC 的多裂纹扩展吸收了更多的能量, 其断裂能明显高于普通纤维混凝土。

### 3.1.2.3 特征长度

通常用 Hillerborg 提出的特征长度  $L_{ch}$  来表示纤维混凝土的脆性性能, 且

$$L_{ch} = E_t G_F / f_t^2 \quad (6)$$

式中:  $L_{ch}$ 、 $E_t$  的单位分别是 mm 和 GPa,  $G_F$ 、 $f_t$  的单位分别是 N/m 及 MPa。

$L_{ch}$  愈小, PVA-ECC 材性愈脆。由表4可见, PV3 的特征长度比 PV1 提高 146%, 表明随着纤维掺量增加, 特征长度逐渐增加, PVA-ECC 的脆性降低, 韧性增加。普通混凝土和聚丙烯纤维混凝土的特征长度平均值分别是 600 mm 和 650 mm<sup>[5]</sup>, ECC 的特征长度介于 1 405 ~ 3 461 mm 之间, 即 PVA-ECC 脆性显著降低。

### 3.2 弯曲韧性试验

PVA 纤维混凝土弯曲韧性试验结果见表5, 包括抗弯韧性指数、峰值荷载和抗弯拉强度。

由表5可知, 在混凝土中掺入纤维, 混凝土的弯曲韧性指数有明显提高。PVA 纤维掺量为 4 kg/m<sup>3</sup> 时,  $I_5$  比素混凝土提高 3.47 倍(素混凝土的韧性指数为 1),  $I_{10}$  比素混凝土提高 5.88 倍,  $I_{30}$  提高 10.64 倍; PVA 纤维掺量为 5 kg/m<sup>3</sup> 时,  $I_5$ 、 $I_{10}$ 、 $I_{30}$  分别比素混凝土提高 3.95、6.89、11.96 倍; PVA 纤维掺量为 6 kg/m<sup>3</sup> 时,  $I_5$ 、 $I_{10}$ 、 $I_{30}$  分别比素混凝土提高 3.78、7.31、12.18 倍。试件 PP1.3 中 PP 纤维掺量为 1.3 kg/m<sup>3</sup>, 韧性指数  $I_5$  比素混凝土试件提高 1.87 倍,  $I_{10}$  比素混凝土提高 3.9 倍,  $I_{30}$  比素混凝土试件提高 4.14 倍。

表5 PVA 纤维混凝土抗弯韧性试验结果

Tab.5 The test results of flexural toughness of PVA fiber reinforced concrete index for PVA-ECC

试件 编号	韧性指数			峰值荷 载/kN	抗弯拉强 度/MPa
	$I_5$	$I_{10}$	$I_{30}$		
C	1.00	1.00	1.00	17.6	5.28
PV4	4.47	6.88	11.64	20.8	6.24
PV5	4.95	7.89	12.96	22.9	6.87
PV6	4.78	8.31	13.18	18.2	5.46
PP1.3	2.87	4.90	5.14	17.6	5.28

PV4 的韧性指数  $I_5$ 、 $I_{10}$ 、 $I_{30}$  分别比 PP1.3 提高 56%、40%、126%; PV5 的韧性指数  $I_5$ 、 $I_{10}$ 、 $I_{30}$  分别比 PP1.3 提高 72%、61%、152%; PV6 的韧性指数  $I_5$ 、 $I_{10}$ 、 $I_{30}$  分别比 PP1.3 提高 67%、70%、156%。结果表明 PVA 纤维混凝土的弯曲韧性指数明显高于 PP 纤维混凝土。这是由于 PVA 纤维与混凝土界面粘结强度高, 且强度和弹性模量高, 它对硬化混凝土变形能力能够有明显改善。

另外, 由于 PVA 纤维强度和弹性模量高,

PVA 纤维混凝土的抗弯拉强度比 PP 纤维混凝土高, PV5 纤维混凝土弯拉强度比 PP1.3 纤维混凝土提高 30%。表明高弹性模量的 PVA 纤维可以提高混凝土的抗弯拉强度。

#### 4 结论

通过对 PVA 纤维增强水泥基复合材料的单轴直接拉伸试验和弯曲韧性试验得出以下结论:

(1) 由  $\sigma - \varepsilon$  曲线可见, PVA - ECC 开裂后仍可承受荷载, 在单轴拉伸荷载作用下实现了应变硬化和多重裂纹开裂。表明 PVA 纤维具有良好的阻裂增韧效用, 能够显著提高了水泥基复合材料的抗裂性能和变形能力。

(2) PVA - ECC 最大拉应变介于  $3\ 800\ \mu\varepsilon$  到  $8\ 657\ \mu\varepsilon$  之间, 是聚丙烯纤维混凝土的 20 ~ 50 倍, 其变形能力显著高于聚丙烯纤维混凝土, 具有高韧性和大变形的特点。

(3) PVA - ECC 断裂能和特征长度分别是聚丙烯纤维混凝土的 2 ~ 4 倍和 2 ~ 5 倍, 表明 ECC 在破坏过程中吸收了更多的能量, 其脆性显著降低, PVA 纤维的增韧阻裂效果显著。

(4) PV6 的  $I_5$ 、 $I_{10}$ 、 $I_{30}$  分别比素混凝土提高 3.78、7.31、12.18 倍, 表明 PVA 纤维明显改善了混凝土弯曲韧性; PV6 的韧性指数  $I_5$ 、 $I_{10}$ 、 $I_{30}$  分别比 PP1.3 提高 67%、70%、156%, 表明 PVA 纤维混凝土的弯曲韧性指数明显高于 PP 纤维混凝土, PVA 纤维对混凝土韧性的改善效果优于 PP 纤维。

#### 参考文献:

[1] 邓宗才. 高性能合成纤维混凝土[M]. 北京: 科学

出版社, 2003.

- [2] 沈荣熹, 崔 琪, 李清海. 新型纤维增强水泥基复合材料[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2004.
- [3] 沈荣熹, 王璋水, 崔玉忠. 纤维增强水泥与纤维增强混凝土[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [4] LI V C. 高延性纤维增强水泥基复合材料的研究进展及应用[J]. 硅酸盐学报, 2007, 35(4): 531 - 536.
- [5] 邓宗才, 李建辉, 傅 智, 等. 聚丙烯纤维混凝土直接拉伸性能的试验研究[J]. 公路交通科技, 2005, 22(7): 45 - 48.
- [6] 姜国庆, 刘小泉, 孙 伟, 等. 高性能特种水泥基复合材料(HPSCC)的关键技术研究[C]//黄承逵, 丁一宁, 何化南. 纤维混凝土的技术进展与工程应用. 大连: 大连理工大学出版社, 2006: 3 - 9.
- [7] 张 君, 公成旭. 高韧性纤维增强水泥基复合材料单轴抗拉性能研究[C]//黄承逵, 丁一宁, 何化南. 纤维混凝土的技术进展与工程应用. 大连: 大连理工大学出版社, 2006: 27 - 32.
- [8] 黄 俊, 姜弘道. 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[C]//黄承逵, 丁一宁, 何化南. 纤维混凝土的技术进展与工程应用. 大连: 大连理工大学出版社, 2006: 96 - 102.
- [9] LI V C, WANG S, WU C. Tensile strain - hardening behavior of PVA - ECC [J]. ACI Mater J, 2001, 98(6): 483 - 492.
- [10] LI V C. Advances in ECC research [J]. ACI Special Publication on Concrete: Material Science to Applications, SP 2002: 206 - 223, 373 - 400.
- [11] LI V C, Leung C K Y. Steady state and multiple cracking of short random fiber composites[J]. ASCE Journal of Engineering Mechanics, 1992, 118(11): 2246 - 2264.

### Tensile Performance and Toughness of PVA Fiber Reinforced Cementitious Composites

XUE Hui - qing, DENG Zong - cai, LI Jian - hui

(College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** Polyvinyl alcohol(PVA) fiber is a new type fiber, which has high strength, elastic modulus and good hydrophilicity, especially compatibility with portland cement. For the preparation of high toughness and large deformation fiber reinforced cementitious composites, uniaxial tensile mechanical properties and flexural toughness behavior of PVA fiber reinforced cementitious composites are introduced in this paper. The results show that PVA fiber has good utility of resistance and toughening, and can improve crack resistance and deformability of cementitious composites apparently; PVA fiber can significantly improve the flexural toughness of concrete, and the flexural toughness indexes of PVA fiber concrete are higher than those of PP fiber concrete.

**Key words:** uniaxial tensile; flexural toughness; crack resistance