

挤压纤维增强水泥板及复合梁抗弯与耐久性能

张君, 李启宏, 侯东伟

(清华大学土木工程系结构工程与振动教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要:研究了水灰比、纤维种类、掺量和水泥基材对挤压成型纤维水泥板及其复合梁的力学性能与耐久性能的影响。结果表明掺加纤维后板材韧性有显著改善;PVA纤维增强板材当纤维掺量达1.7%时表现应变硬化,出现多点开裂;PP纤维则呈现应变软化。两种纤维增强水泥基材料性能的差异是由于纤维自身性能的不同。以纤维增强板为底板,制作的纤维板/混凝土复合梁的极限荷载和相应挠度,与普通混凝土梁相比都得以改善;同时与普通混凝土梁相比,复合梁的抗氯离子渗透性能更好。

关键词:挤压成型;纤维增强水泥板;力学性能;耐久性能

中图分类号:TU528 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2009)06-0081-05

Mechanical Properties and Durability of Extruded Fiber Reinforced Cement Mortar Board and Its Composite Beam

ZHANG Jun, LI Qi-hong, HOU Dong-wei

(Department of Civil Engineering, Key Laboratory of Structural Engineering and Vibration of Education Ministry, Tsinghua University, Beijing 100084, P. R. China)

Abstract: The effect of water to cement ratio, fiber types and content, cement types on the bending performance of the extruded fiber reinforced cementitious board were studied. And it was found that polyvinyl alcohol (PVA) fibers can significantly improve the ductility of the board compared with polypropylene (PP) fibers. As PVA fiber content achieved 1.7%, the strain hardening and multiple cracking were occurred on the extruded board, while strain-softening were shown on PP fiber reinforced cement board. The difference between the two kinds of board was from the differences of the mechanical properties of the two fibers. In addition, taking the fiber reinforced extruded board as base, the ultimate bending strength, as well as and the corresponded deflection and the resistant to chloride iron penetrating, was improved for a composite beam with fiber board and concrete compared with those of traditional concrete beam.

Key words: extrusion molding; fiber reinforced cement board; mechanical property; durability

普通水泥基材具有很高的抗压强度、较大的刚度,但存在收缩大、抗拉强度低、极限延伸率小以及抗冲击性差等缺点。将纤维加入水泥基材中可以改善水泥基材的抗拉、抗冲击性能,起到阻裂,提高其韧性的作用。为了克服传统混凝土材料的脆性和应

变软化特性,人们开始借助微观、细观力学手段研究具有应变硬化特性的水泥基材料,其中基于细观力学设计的高韧性纤维增强水泥基复合材料(Engineered Cementitious Composite-ECC)是当前比较成功的具有应变硬化特性的水泥基材料之

收稿日期:2009-06-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50878119)

作者简介:张君(1962-),男,教授,博士生导师,主要从事纤维增强混凝土研究,(E-mail)junz@tsinghua.edu.cn

一^[1-3]。应变硬化是指材料在单轴拉伸时,在极限抗拉应变到达之前,应力随应变增加而增大。其形成机理为材料在受拉过程中形成许多微细裂纹而承载力不降低,多条微细裂纹的形成将可能使材料的宏观拉应变增大数十,甚至上百倍。由于存在于裂纹间的纤维的桥接作用,材料整体的传力性能并没有因为微细裂纹的形成而被显著削弱。增强纤维是使材料具有应变硬化特性的关键,纤维的种类、长度、断面尺寸以及与水泥基材的粘结特性都将会影响材料的宏观抗拉性能。除了抗拉,高韧性纤维增强水泥基复合材料在抗弯荷载作用下也会呈现荷载随着挠度的增加而增大的“应变硬化”的特性。

纤维增强水泥板应用相当广泛,可应用于外墙板,桥梁维护结构和永久性模板等。作为模板可以简化施工工序,节省施工时间,而且作为维护结构可以减小浇筑混凝土的干燥收缩,进而减少收缩开裂。此外,这种纤维板作为模板表面光滑,而且由于其具有良好的抗裂性能、抗冻融循环性能和抗碳化性能,而使结构具有良好的耐久性能^[4-5]。与浇筑成型相比,采用挤压与挤出成型方法可以使板材更加密实,该文中采用课题组自行设计的挤压脱水成型设备成型纤维增强水泥板材^[6],研究了不同纤维、不同基材、不同纤维掺量对板材的抗弯性能,以及采用纤维水泥板作底面模板时,其对复合混凝土梁力学性能和耐久性能的影响。

1 原材料与实验方法

1.1 实验原材料

实验用水泥为研究组自行研制的低缩复合水泥及北京市水泥厂生产的京都牌 P·O42.5 水泥;成型板材用细骨料为 0.08~0.63 mm 筛洗烘干的河砂;复合梁用混凝土细骨料采用最大粒径为 5 mm 的河砂,粗骨料为最大粒径为 20 mm 的破碎石灰石;增稠剂采用韩国三星化学品公司生产的羟丙基甲基纤维素醚 PMC-40US;减水剂采用萘系-氨基磺酸盐复合高效减水剂;纤维为日本 Kuraray 公司生产的聚乙烯醇纤维(PVA 纤维)和衡水科维化纤制品有限公司生产的聚丙烯纤维(PP 纤维),其性能见表 1,其中 T 为抗拉强度, M 为弹性模量, d 为纤维直径, l 为纤维长度。粉煤灰为内蒙古元宝山发电厂生产,密度为 2.28 g/cm^3 的一级低钙灰;混凝土界面剂为北京市治建特种材料公司生产的 302 混凝土界面剂,将界面剂涂抹于板材内表面 20 min 后浇筑混凝土。

表 1 纤维的材性

纤维	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	T/MPa	M/GPa	d/mm	l/mm
PVA	1.2	1 620	42.8	0.039	8
PP	0.91	>400	>2.5	0.059	12

1.2 实验方法及配比

通过调整减水剂和增稠剂用量,使拌和料流动度和工作性能达到实验模具浇筑成型的要求,然后浇入图 1 所示的自制挤压成型设备中成型。浇筑完毕后,放至液压控制压力实验机加压台上加压脱水。加压钢板依次以 1.5、1.0、0.5、0.3 mm/min 的速度分别加载至 80、100、120、150 kN,每级荷载均保持 300 s。板材成型后的水灰比通过如下方法粗略估算:称量计算出加入试模的拌合料质量,然后称量出挤出水的质量,最后计算出挤后水灰比。成型好的板材如图 2 所示。试验板材采用 2 种水泥基材、2 种纤维,选用 0.45、0.35、0.25 3 种水灰比,纤维掺量选用 0.0%、0.5%、1.0%、1.5%、1.7% 5 个体积掺量,具体的配方如下表 2 所示。板材经过挤压脱水后,上述 3 种水灰比的板材挤后水灰比为 0.38、0.30、0.23 左右。挤压成型的时间和持续对板材的力学性能会有一定影响,通过加压脱水成型,不仅可降低板材的实际水灰比,而且可减少拌和料中的气泡和孔隙,使得板材更密实。该文实验中各配比均采用了相同的挤压等级和持续时间,各配比的挤压脱水过程主要在前 2 个荷载等级完成,当达到 150 kN 荷载等级时已经基本没有更多的水被挤出。

表 2 砂浆配合比

拌和 水灰比	挤压后 水灰比	砂灰比	增稠剂 用量/%	各纤维掺量下减水剂用量/%				
				1.7%	1.5%	1.0%	0.5%	0.0%
0.45	~0.38	0.8	0.015	0.7	0.7	0.6	0.2	0.0
0.35	~0.30	0.5	0.015	1.0	1.0	0.8	0.6	0.3
0.25	~0.23	0.3	0.015	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5

注:增稠剂和减水剂用量为水泥总用量的质量百分比,纤维掺量为砂浆整体体积的体积百分比。

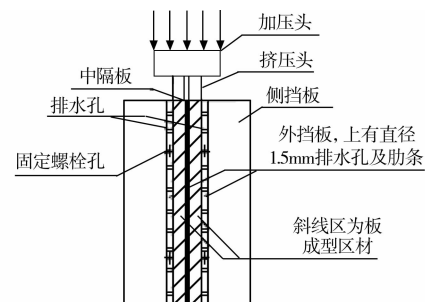


图 1 板材挤压成型模具示意图

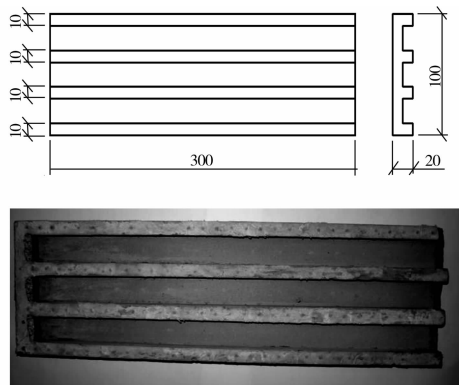


图2 成型好的挤压成型砂浆板材示意图及实物图

挤压成型板在浇筑 24 h 后拆模置于温度为

20 ± 2 °C, 湿度为 59%~65% 的环境中养护至 50 d, 然后在 Toni 2071 型抗折试验机上进行 3 点抗弯试验, 跨距 280 mm。试验采用跨中挠度控制, 加载速率为 0.25 mm/min。同时, 挤压成型板材在标准养护 14 d 后浇筑复合梁, 其结构如图 3 所示。复合梁在标准养护 21 d 后在 Toni 2071 型抗折试验机上进行 3 点抗弯试验; 加载速率为 0.15 mm/min, 跨距为 280 mm。复合梁耐久性能采用抗氯离子渗透系数衡量, 该文采用 NEL 法进行测试, 在复合梁底部截取 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 尺寸的试块进行测试, 素混凝土梁在相同位置截取对比样, 氯离子测试装置如图 4 所示。

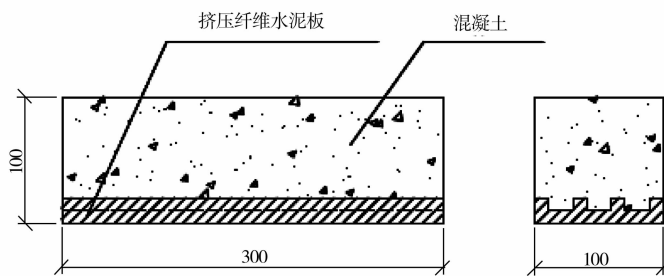


图3 组合梁示意图

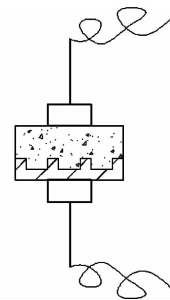


图4 氯离子渗透试验

2 实验结果与讨论

2.1 板材力学性能

图 5 为各配比 PVA 纤维挤压成型板材的抗弯荷载-挠度曲线, OPC 表示普通硅酸盐 P·O42.5 水泥, FH 表示复合水泥, 下同。从图示结果首先可以看出, 不掺纤维的素水泥砂浆板材呈明显脆性断裂, 而掺加纤维后的板材都是延性破坏的, 且随着纤维掺量的增加, 曲线的应变硬化段延长, 强度提高, 应变软化段出现点的也相应延后。其次, 当纤维体积掺量达 1.7% 时, 板材的延性明显提高, 且出现“锯齿状”的应变硬化段, 说明此时受拉区有多点开裂现象, 并出现多条微细裂纹。图 6 为各配比挤压成型 PP 纤维板材的抗弯荷载-挠度曲线, 与 PVA 纤维增强板材不同, 极限荷载后下降段较长, 应变硬化不明显, 呈现水平发展的趋势, 在较大挠度范围内保持较低的荷载。

由图 5、图 6 所示结果可以看出, 2 种纤维增强水泥板材的力学性能有很大的差异, 这跟纤维本身的性能有关。从表 1 可以知 PVA 纤维的抗拉强度是 PP 纤维的 4 倍, 弹性模量是后者的 17 倍, 两者的直径和长度也不同, 这些性能上的差异综合导致了 2 种板材的弯拉性能的显著不同。研究表明, 纤维增强水泥基复合材料在拉伸荷载作用下能否实现多点开裂与应变硬化, 取决于裂纹间纤维的桥接应力

强弱与基材的断裂韧性。定性上讲, 强的纤维桥接应力或低韧性的基材有助于应变硬化与多重裂纹形成。纤维桥接应力一方面是纤维数量的函数, 从这个角度看, 纤维越细, 相同含量下纤维根数越多, 对桥接应力越有利, 由于 PVA 纤维直径和长度都较小, 因此相同体积掺量时其纤维根数较多, 其桥接应力相应也就强。但上述结论成立的条件是保证纤维从水泥石中拔出, 而不是在拔出过程中断裂而退出桥接作用。根据断裂力学理论, 由文献[7]可得 PVA 纤维的允许的最长纤维长度为 8~16 mm, 而实验采用的 PVA 纤维长度为 8 mm, 满足拔出的要求。因此, PVA 纤维在基材中可以保证大多数拔出, 少量断裂, 致使以 PVA 纤维为增强组分的复合材料在掺量一定时表现出明显的应变硬化与多点开裂特征。又由文献[7]可知 PP 纤维与水泥石之间的界面粘结强度约为 0.8~1.2 MPa, 由此可得其最大允许长度应约为 9.8~14.8 mm。而由于文中采用挤压成型, 实际的界面粘结强度要更高, 要使 PP 纤维从水泥石中拔出, 其最大允许长度应接近上述范围得下限(9.8 mm)或者更低, 而文中所用 PP 纤维长度为 12 mm, 因此在抗拉荷载下, 该文所用 PP 纤维将逐渐断裂而非拔出, 因此在 PP 纤维水泥板中没有出现像 PVA 纤维水泥板那样明显的应变硬化和多点开裂的现象。图 7 为典型配比的两种纤维增强板材抗弯性能的对比, 可见二者性能差异显著。

此外,水泥基材种类对板材的抗弯性能影响不大,但 收水泥种类影响较大,其机理有待进一步研究。值得注意的是低水灰比(0.25)时 PP 纤维增强板材

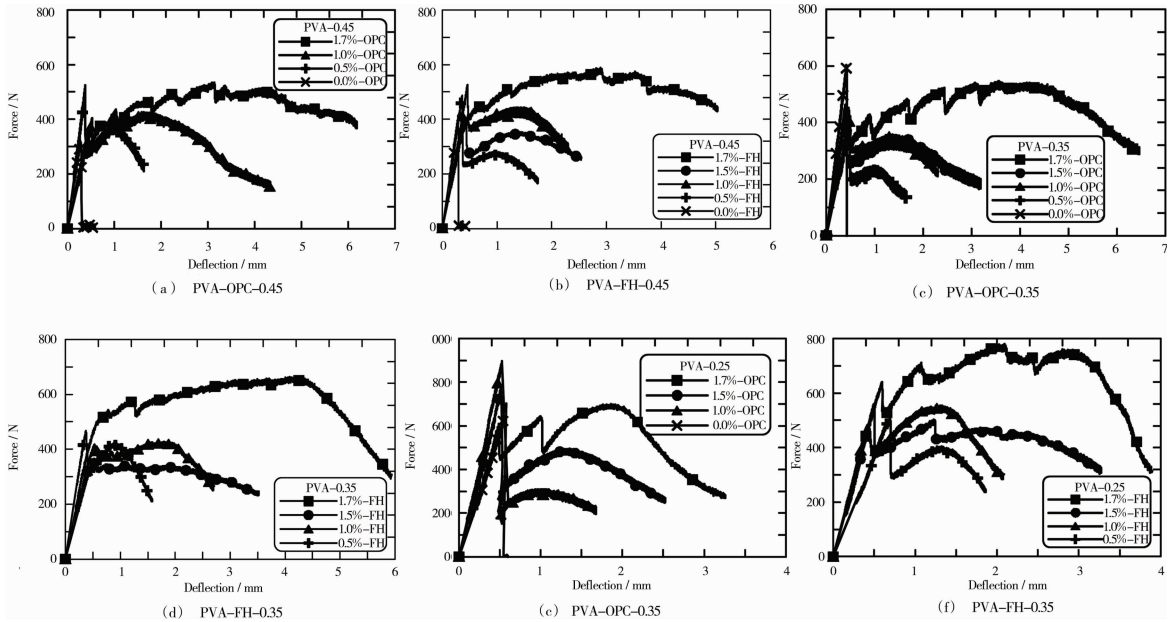


图 5 各配比 PVA 纤维增强板抗弯荷载挠度曲线

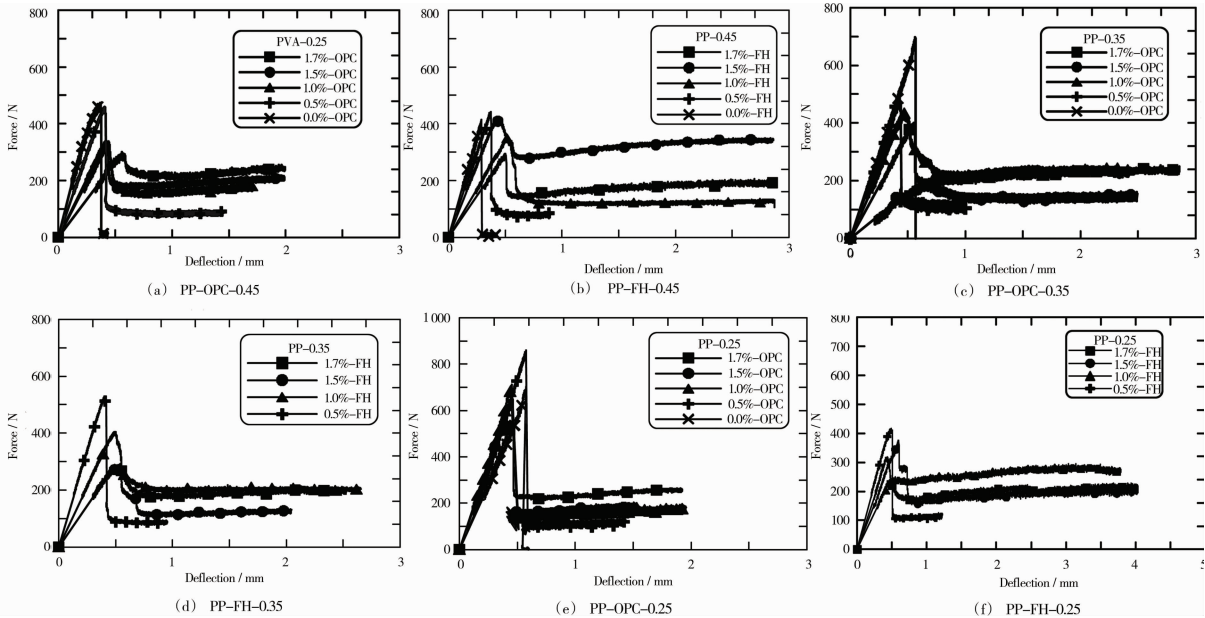


图 6 各配比 PP 纤维增强板抗弯荷载挠度曲线

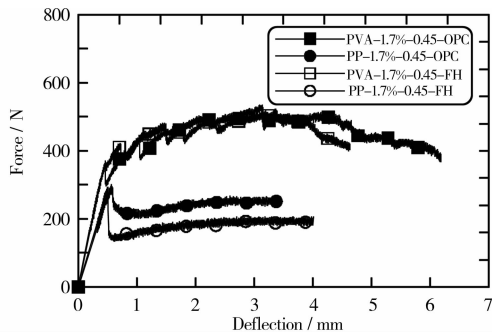


图 7 2 种纤维、2 种基材增强板的荷载-挠度曲线对比

2.2 复合梁力学性能

图 8 为 1.7% 纤维体积掺量时各配比板材的复合梁抗弯应力-挠度曲线,其中 KB 表示同配比的素混凝土梁。由图示结果可以看出,与素混凝土梁相比复合梁的极限承载力有所提高,例如 0.25 水灰比时各配合比板材的复合梁极限承载力是素混凝土梁的 1.5 倍;此外,与素混凝土梁相比,复合梁的极限挠度增大,水灰比较大时,例如 0.45,延性改善较大,而水灰比较小时,例如 0.25,延性改善较小,复

合梁呈脆性破坏。复合梁力学性能的改善是由于混凝土本身呈脆性,抗拉性能较差,而纤维增强水泥板具有抗拉性能好,延性好等优点。在混凝土梁受拉区复合一层纤维水泥板,提高了复合梁底部的抗拉

性能,又较为充分地发挥了混凝土的抗压性能,从而其总体力学性能得以改善。但是由于本试验中板较薄,因此对复合梁力学性能的改善有限。

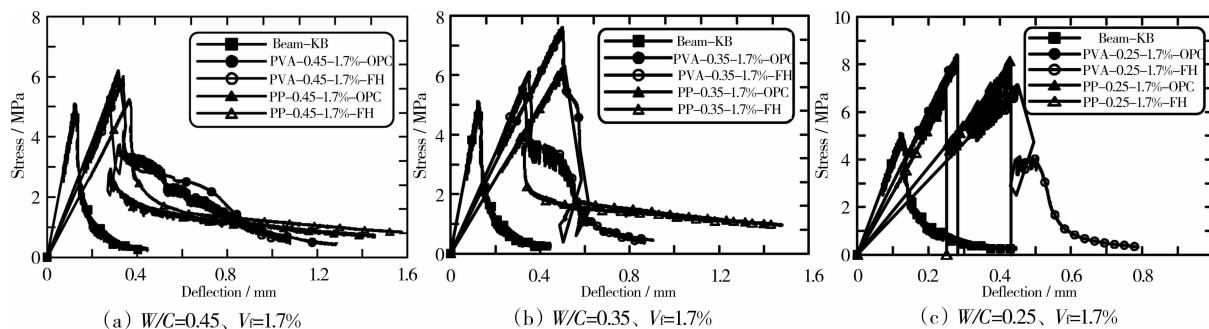


图8 纤维体积掺量1.7%的不同配比挤压板与混凝土复合梁抗弯应力-挠度曲线

2.3 复合梁耐久性能

表3为典型配比的PVA纤维板材复合梁抗氯离子渗透系数测定结果。从表中所示结果可以看出,拌合水灰比为0.25时,对于两种水泥基材,纤维板均有利于改善复合梁的抗氯离子渗透性能,降低了氯离子渗透系数。相比之下,以复合水泥为基材的板材对复合梁抗氯离子渗透性能的改善效果更好些。所以纤维增强水泥板作为模板或维护结构,可以起到较好的保护主体结构的作用,可提高结构的耐久性能。

表3 复合梁的抗氯离子渗透性能

种类	NEL值/ $\times 10^{-8}$	种类	NEL值/ $\times 10^{-8}$
素混凝土梁	4.6	素混凝土梁	4.9
复合梁(FH-1.7%)	3.7	复合梁(OPC-1.7%)	4.7
素混凝土梁	5.0	素混凝土梁	3.5
复合梁(FH-1.5%)	3.5	复合梁(OPC-1.5%)	3.1

3 结论

1) 掺加纤维后,挤压成型纤维增强水泥基材板的性能有显著改善。与纯水泥砂浆板相比,纤维板呈延性破坏,且随着纤维掺量的增加延性更好。

2) 抗弯荷载下,挤压成型的PVA纤维增强水泥基板呈现应变硬化的现象,当掺量达1.7%时出现多微裂缝开裂;而挤压成型的PP纤维增强水泥基板呈现应变软化。

3) 与素混凝土梁相比,以挤压成型纤维板为模板的混凝土复合梁极限强度、挠度都有改善。

4) 纤维板为模板的混凝土复合梁与普通混凝土梁相比,氯离子渗透性更低。

参考文献:

- [1] LI V C. Advances in ECC Research[J]. ACI Special Publication on Concrete: Material Science to Applications, 2002, SP206(23): 373-400.
- [2] ZHANG J, GONG C X, ZHANG M H, et al. Engineered cementitious composite with characteristic of low drying shrinkage[J]. Cement and Concrete Research, 2009, 39(4): 303-312.
- [3] 公成旭, 张君. 水灰比及粉煤灰参量对高韧性纤维增强水泥基复合材料单轴抗拉性能的影响[J]. 水利学报, 2008, 139(3): 361-366.
GONG C, ZHANG J. Uniaxial tension behavior of high ductile fiber reinforced cementitious composite with focus on some influencing factors [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 139(3): 361-366.
- [4] KANJI Y, RYU S, TAKASHI F, et al. Application of extrusion molded DFRCC to permanent form [C]// Fischer G, Li, V. C., In High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites (HPRFCC) in Structural Applications. France: RILEM Press, 2004: 253-260.
- [5] ZHANG J, LEUNG C K Y, CHEUNG Y. Flexural performance of layered ECC-concrete composite beam [J]. Composite Science and Technology, 2006, 66: 1501-1512.
- [6] 李启宏, 侯东伟, 张君. 纤维水泥加压板收缩性能[J]. 清华大学学报, 2009, 49(9): 27-30.
LI Q, HOU D, ZHANG J. Shrinkage properties of extruded fiber reinforced cement mortar board [J]. J Tsinghua Univ (Sci and Tech), 2007, 47(3): 309-312.
- [7] LI V C, WU C, WANG S, et al. Interface tailoring for strain-hardening PVA-ECC[J]. ACI Materials Journal, 2002; 99(5): 463-472.

(编辑 胡玲)