

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.S1.030

聚乙烯醇纤维水泥基复合材料拉压比试验研究

刘曙光^a, 郑德路^b, 闫长旺^a, 张菊^a, 张华^b, 王志伟^b

(内蒙古工业大学 a. 矿业学院; b. 土木工程学院, 呼和浩特 010051)

摘要:立方体抗压强度和劈裂抗拉强度试验, 是研究聚乙烯醇纤维对水泥基复合材料拉压比性能影响的最直接的方法。立方体试件的尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm, PVA 纤维掺量分别为 0、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%, 粉煤灰掺量为 30%、50%。试验结果表明, 掺入 PVA 纤维对立方体抗压强度影响不显著, 而劈裂抗拉强度则提高了 42.64%~135.12%, 拉压比提高 36.82%~134.27%; 30% 粉煤灰掺量的水泥基复合材料比 50% 粉煤灰掺量的水泥基复合材料抗压强度高 20% 以上, 但对劈裂抗拉强度影响不明显。PVA 纤维水泥基复合材料立方体抗压试块裂缝开展路径较多, 不易破碎, 抗压韧性显著增强。

关键词:拉压比; 聚乙烯醇; 抗压强度; 劈裂抗拉

中图分类号:TU528.581 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)S1-0134-05

Experimental Study of Ratio Between Splitting Tensile Strength and Compressive Strength for PVA Fiber Cementitious Composites

Liu Shuguang^a, Zheng Delu^b, Yan Changwang^a, Zhang Ju^a, Zhang Hua^b, Wang Zhiwei^b

(a. School of Mining and Technology; b. College of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, P. R. China)

Abstract: An experimental study of the splitting tensile strength and compressive strength were carried out. Effects of PVA fiber was analyzed on ratio between splitting tensile strength and compressive strength. The dimensions of cubic specimens were 100 mm×100 mm×100 mm. PVA fiber were added at the volume fractions of 0, 0.5%, 1%, 1.5%, 2% and the fly ash content were 30%, 50%. The test results indicate that, the compressive strength varies very little after incorporation with PVA fiber, however, the splitting tensile strength increases from 42.64% to 135.12% and the ratio between splitting tensile strength and compressive strength increases from 36.82% to 134.27%. What's more, the compressive strength of cementitious composite including fly ash at the ratio of 30% is 20% higher than that of 50%, and there is no obvious improvement on the splitting tensile strength with the change of fly ash content. This paper also shows that the compressive test cube of PVA fiber cementitious composites has multiple cracks and is hardly crumbled in the degradation process, and then the compressive toughness can be enhanced significantly.

Key words: ratio between splitting tensile strength and compressive strength; polyvinyl alcohol; compressive strength; splitting tensile strength

Li 在 1992 年提出了关于超高韧性水泥基复合材料的有关理论基础, 之后聚乙烯醇 (polyvinyl alcohol 简称 PVA) 纤维水泥基复合材料的研究取得了很大的进展^[1-2]。与混凝土相比, 聚乙烯醇纤维水泥基复合材料具有较低的水渗透率^[3]和更好的耐久性^[4]。PVA 纤维是一种高强度合成纤维, 本身具有良好的亲水性和较高的弹性模量, 不但能够有效抑制水泥基体早期的塑性裂缝产生, 还能提高水泥基体的韧性和抗冲击性^[5]。Li 等对 PVA-ECC 进行了单轴拉伸试验, 测得 PVA 纤维水泥基复合材料具有较大的极限拉应变^[6]; 李贺东通过改进的直接拉伸试验方法对超高韧性水泥基复合材料 (简称 UHTCC) 进行了试验, 结果表明 PVA 纤维具有良好的裂

缝抑制能力^[7]; Sahmaran 等对 PVA 纤维水泥基复合材料的冻融循环试验测得, PVA 纤维有效的提高了水泥基体的延展性及抗冻融性^[8]; 徐世焯等通过三点弯曲梁试验证明, PVA 纤维的加入使水泥基复合材料的延性和韧性得到改善^[9]; 李贺东由薄板四点弯曲试验说明 PVA 纤维水泥基复合材料具有与金属相比拟的弯曲变形能力^[10]。

拉压比为劈裂抗拉强度与立方体抗压强度的比值。拉压比是评定水泥基复合材料脆性的一个重要指标, 例如混凝土强度越高, 其拉压比越小, 脆性越大, 韧性越小^[11]。夏广政的研究结果表明^[12], 钢纤维和聚丙烯纤维均能增大高性能混凝土的拉压比, 并降低其脆性; 徐世焯通过 PVA-ECC 与混凝

收稿日期: 2012-11-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50968011, 51168033); 内蒙古自然科学基金项目 (2012MS0706); 内蒙古自治区高等学校科学研究项目 (NJZY12058); 内蒙古工业大学科学研究项目 (ZS201137)

作者简介: 刘曙光 (1960-), 男, 教授, 主要从事混凝土基本理论研究, (E-mail) liusg6011@126.com。

土的抗压强度比较,表明 PVA 纤维不能提高水泥基的抗压强度^[13]。钱红萍试验证明 PVA 能显著改善混凝土的劈裂抗拉强度^[14]。可见,掺入 PVA 纤维可有效降低水泥基体的脆性。因此,笔者利用日本生产的经过表面处理的 K-II 可乐纶纤维,通过在水泥基复合材料中掺入不同比例的 PVA 纤维及粉煤灰,进行立方体抗压强度与劈裂抗拉强度试验,研究 PVA 纤维和粉煤灰对立方体抗压强度与劈裂抗拉强度的影响,分析 PVA 纤维水泥基复合材料的拉压比性能,从而确定 PVA 纤维和粉煤灰是否对水泥基复合材料起到脆性改善和韧性的增强作用。

1 试验概况

1.1 试验原材料

水泥:水泥选用冀东牌 P.O 42.5R 级普通硅酸盐水泥。

石英砂:选用坚硬、耐磨、化学性能稳定的优质硅砂(主

要成分 SiO_2),骨料粒径为 0.1~0.2 mm。

减水剂:选用大连西卡建筑材料有限公司生产的高效减水剂,型号为 3301E。

粉煤灰:选用华宇有限公司生产的一级粉煤灰。

增稠剂:选用山东德州金月生化有限公司生产的 MK-100000S 羟丙基甲基纤维素,简称 HPMC。

PVA 纤维:选用日本 Kuraray 公司生产的 K-II 可乐纶纤维。

1.2 配合比设计

PVA 纤维水泥基复合材料采用强制式搅拌机搅拌。加料工艺为水泥、石英砂、粉煤灰→水→增稠剂→消泡剂、减水剂→纤维→出料。纤维加入前需搓均匀,这样可以有效的防止纤维在搅拌过程中堆积成团,如图 1 所示。PVA 纤维水泥基复合材料的配合比如表 1 所示。



图 1 均匀的纤维

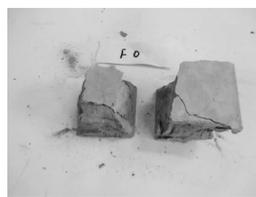


图 2 F0 抗压试块破坏形态

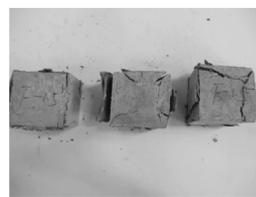


图 3 F1.5 抗压试块破坏形态



图 4 劈裂试块

表 1 PVA 纤维水泥基复合材料的配合比

编号	水泥	水	粉煤灰	石英砂	减水剂/(%)	增稠剂/(%)	消泡剂/(%)	纤维体积率/%
F0-30%	0.7	0.26	0.3	0.600	0.020 0	0.000 5	0.020 5	0
F0.5-30%	0.7	0.26	0.3	0.600	0.020 0	0.000 5	0.020 5	0.5
F1.0-30%	0.7	0.26	0.3	0.600	0.020 0	0.000 5	0.020 5	1.0
F1.5-30%	0.7	0.26	0.3	0.600	0.020 0	0.000 5	0.020 5	1.5
F2.0-30%	0.7	0.26	0.3	0.600	0.020 0	0.000 5	0.020 5	2.0
F0.5-50%	0.5	0.26	0.5	0.600	0.020 0	0.000 5	0.020 5	0.5
F1.0-50%	0.5	0.26	0.5	0.600	0.020 0	0.000 5	0.020 5	1.0
F2.0-50%	0.5	0.26	0.5	0.600	0.020 0	0.000 5	0.020 5	2.0

注:F1.5-30%中 1.5 代表 PVA 纤维体积率为 1.5%,30%代表粉煤灰替代水泥量的百分比为 30%;%C 代表占胶凝材料质量的百分比。

1.3 试件制作与试验方法

根据《钢纤维混凝土结构试验方法》(CECS 13:89)的有关规定,立方体抗压强度与劈裂抗拉强度试验均采用 100 mm×100 mm×100 mm 立方体试块,每组 3 块,试块成型后在标准条件下养护 28 d,取其平均值作为每组的强度。在立方体抗压强度试验中,加载速度为 1.0 MPa/s;在劈裂抗拉强度试验中,加载速度为 0.1 MPa/s。

2 结果分析

不同纤维掺量的 PVA 纤维水泥基复合材料的立方体抗压强度和劈裂抗拉强度试验值,如表 2 所示;表 3 中则列出了不同粉煤灰掺量的 PVA 纤维水泥基复合材料强度试验结果,并与相同纤维掺量的复合材料做了对比;PVA 纤维掺量的增加对立方体抗压强度、劈裂抗拉强度以及拉压比的提高程度如图 5 所示。

表 2 PVA 纤维水泥基复合材料试验结果

试件编号	$V_f/\%$	立方体抗压强度 f_{cd}		劈裂抗拉强度 f_{ct}		拉压比 f_{ct}/f_{cd}	
		测量值/MPa	提高程度 $\lambda/\%$	测量值/MPa	提高程度 $\lambda/\%$	测量值/MPa	提高程度 $\lambda/\%$
F0-30%	0	91.00	—	6.52	—	0.0712	—
F0.5-30%	0.5	94.87	4.25	9.30	42.64	0.098 0	36.82

续表 2

试件编号	$V_f/\%$	立方体抗压强度 f_{cf}		劈裂抗拉强度 f_{ct}		抗压比 f_{ct}/f_{cf}	
		测量值/MPa	提高程度 $\lambda/\%$	测量值/MPa	提高程度 $\lambda/\%$	测量值/MPa	提高程度 $\lambda/\%$
F1.0-30%	1.0	94.20	3.52	10.98	68.40	0.116 6	62.68
F1.5-30%	1.5	94.40	3.74	13.80	111.66	0.146 2	104.03
F2.0-30%	2.0	91.33	0.36	15.33	135.12	0.167 8	134.27

表 3 不同粉煤灰掺量的 PVA 纤维水泥基复合材料试验结果

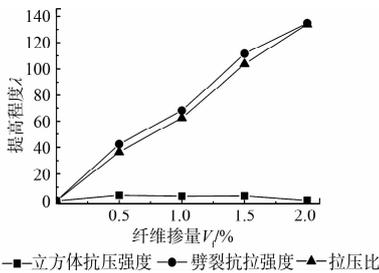
试件编号	立方体抗压强度 f_{cf}			劈裂抗拉强度 f_{ct}			抗压比 f_{ct}/f_{cf}	
	30%测量值/MPa	50%测量值/MPa	提高程度 $\lambda/\%$	30%测量值/MPa	50%测量值/MPa	提高程度 $\lambda/\%$	30%测量值/MPa	50%测量值/MPa
F0.5	94.87	73.87	28.43	9.30	9.03	2.99	0.098 0	0.122 2
F1.0	94.20	77.67	21.28	10.98	10.97	0.09	0.116 6	0.141 2
F2.0	91.33	75.60	20.81	15.33	14.53	5.50	0.167 9	0.192 2

注:30%、50%是指粉煤灰替代水泥百分比为 30%、50%的纤维水泥基复合材料。

2.1 立方体抗压强度

在立方体抗压强度试验中,未掺入纤维的试块呈现出很强的脆性,试块裂缝单一,破坏时呈爆裂式,有大量碎块脱落,试块的破坏形态呈对角锥形,如图 2 所示。而掺入纤维的试块,裂缝开展路径较多,裂而不散,表现出一定程度上的塑性破坏,如图 3 所示。当粉煤灰掺量为 30%而 PVA 纤维掺量不同时,立方体抗压强度基本没有变化,当纤维掺量 V_f 为 0.5%时,PVA 纤维水泥基复合材料立方体抗压强度最大, V_f 为 2%时,PVA 纤维水泥基复合材料立方体抗压强度反而小,如图 6 所示,这种情况可能是由于在水灰比较低的情况下,高掺量的 PVA 纤维难以在试块内部形成均匀分布,试块中存在的含气量大,以至出现立方体抗压强度有所降低的结果。

粉煤灰掺量为 30%与 50%的复合材料的抗压强度对比值如图 7 所示,可看出粉煤灰掺量为 30%的复合材料抗压强度比粉煤灰掺量为 50%的复合材料高出 20%以上,说明粉煤灰对立方体抗压强度具有较大影响效果。



注:■-立方体抗压强度 ●-劈裂抗拉强度 ▲-抗压比

图 5 PVA 纤维掺量与提高程度 λ 的关系

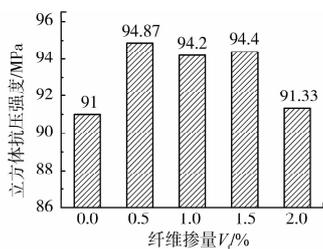


图 6 PVA 纤维掺量 V_f 与立方体抗压强度 f_{cf} 的关系

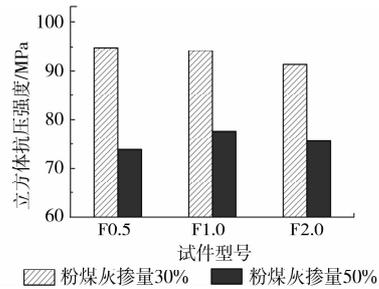


图 7 粉煤灰掺量与立方体抗压强度 f_{cf} 的关系

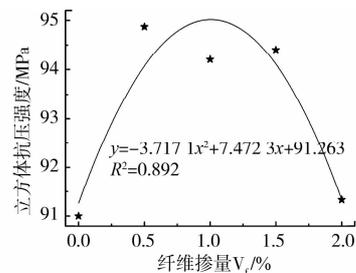


图 8 PVA 纤维掺量与立方体抗压强度 f_{cf} 的拟合曲线

根据 PVA 纤维掺量 V_f 、掺加纤维的水泥基复合材料的立方体抗压强度试验值 f_{cf} 以及未掺加纤维的立方体抗压强度试验值 f_c ,模拟出基于 V_f 和 f_c 的 PVA 纤维水泥基复合材料立方体抗压强度的预测模型:

$$f_{cf} = f_c + a_1 V_f + b_1 V_f^2 \quad (1)$$

利用本试验数据拟合可得到模型中系数 $a_1 = 7.4723$, $b_1 = -3.7171$ 并得到未掺入 PVA 纤维的试块的立方体抗压强度预测值 $f_c = 91.263$ 。由此可得到 f_{cf} 、 f_c 和 V_f 的关系为

$$f_{cf} = 91.263 + 7.4723V_f - 3.7171V_f^2 \quad (2)$$

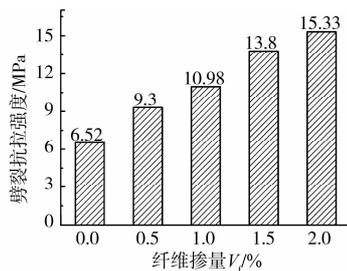
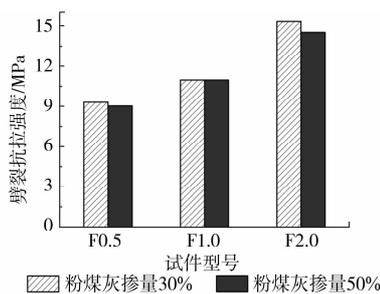
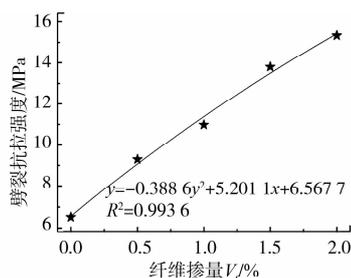
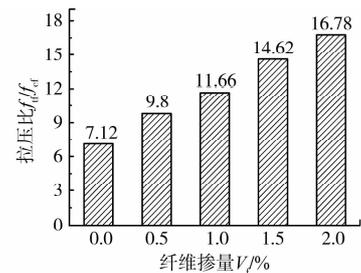
拟合得到的相关系数 $R^2 = 0.892$,说明此二次曲线比较合理,拟合曲线如图 8 所示。将拟合公式所得的预测值与试验值相比较,误差值在 $\pm 0.86\%$ 之内,数据吻合较好,如表 4 所示。

表 4 预测值与试验值的对比

试件编号	立方体抗压强度 预测值/MPa	立方体抗压强度 试验值/MPa	误差/%	劈裂抗拉强度 预测值/MPa	劈裂抗拉强度 试验值/MPa	误差/%
F0-30%	91.263	91.00	-0.28	6.568	6.52	-0.72
F0.5-30%	94.070	94.87	0.85	9.071	9.30	2.52
F1.0-30%	95.018	94.20	-0.86	11.380	10.98	-3.51
F1.5-30%	94.108	94.40	0.31	13.495	13.80	2.26
F2.0-30%	91.340	91.33	-0.01	15.416	15.33	-0.56

2.2 劈裂抗拉强度

在立方体劈裂抗拉强度的试验过程中,未掺纤维的试块在出现裂缝后,裂缝迅速延伸至整个平面并导致试块裂成两半,而掺入 PVA 纤维的试块,在出现裂缝后,裂缝贯穿整个平面的过程比较缓慢,并且对于 F1~F2 的试块,在裂缝贯通后试块裂而不碎,如图 4 所示。掺入纤维后,试件的劈裂抗拉强度值明显增大,如图 9 所示,特别是对于 F1.5 及 F2 的试块,其劈裂抗拉强度值比未掺入纤维的水泥基体劈裂抗拉强度值分别高出 111.66% 和 135.12%。PVA 纤维水泥基复合材料的劈裂抗拉强度随着纤维掺量的增加而依次递增。两种粉煤灰掺量的试块劈裂抗拉强度值大小相近,如图 10 所示,说明粉煤灰掺量对劈裂抗拉强度的影响不显著。

图 9 PVA 纤维掺量与劈裂抗拉强度 f_{tf} 的关系图 10 粉煤灰掺量与劈裂抗拉强度 f_{tf} 的关系图 11 PVA 纤维掺量与劈裂抗拉强度 f_{tf} 的拟合曲线图 12 PVA 纤维掺量与拉压比 f_{tf}/f_c 的关系

根据本文中 PVA 纤维掺量 V_f 与水泥基复合材料的劈裂抗拉强度试验值 f_{tf} 以及未掺纤维的立方体抗压强度试验值 f_c , 模拟出基于 V_f 和 f_c 的 PVA 纤维水泥基复合材料劈裂抗拉强度的预测模型:

$$f_{tf} = a_2 \sqrt{f_c} + b_2 V_f + c V_f^2 \quad (3)$$

利用本试验数据拟合可得到模型中系数 $a_2 = 0.6875$, $b_2 = 5.2011$, $c = -0.3886$, 由此可得到 f_{tf} 、 f_c 和 V_f 的关系如下:

$$f_{tf} = 6.5677 + 5.2011 V_f - 0.3886 V_f^2 \quad (4)$$

其中相关系数 $R^2 = 0.9936$, 极其接近 1, 说明关系式合理, 如图 11 所示。将拟合公式所得的预测值与试验值相比较, 可得误差值在 $\pm 3.51\%$ 之内, 误差较小, 如表 4 所示。

2.3 拉压比分析

拉压比是衡量混凝土力学性能的一个重要指标。国内外已有研究资料^[15-16]表明:普通混凝土的拉压比为 0.058~0.125, 且强度越高, 拉压比越小, 而高强混凝土的拉压比仅为 0.042~0.050。本试验中, PAV 纤维水泥基复合材料的拉压比为 0.0980~0.1678, 说明 PVA 纤维有效的改善了水泥基复合材料的脆性。掺入纤维后, 立方体的抗压强度基本无变化, 而劈裂抗拉强度增长幅度则很大, 如图 5 所示, 拉压比也随着 PVA 纤维掺量的增加而增大。由表 2 所示的试验数据可知, 掺入 PVA 纤维后, 拉压比提高程度为 36.82%~134.27%, 和混凝土相比较显著的改善了脆性大, 韧性小的缺点。由于粉煤灰掺量为 30% 的 PVA 纤维水泥基复合材料与掺量为 50% 的 PVA 纤维水泥基复合材料相比抗压强度高 20.81%~28.43%, 而劈裂抗拉强度几乎无变化, 这就使得粉煤灰掺量为 50% 的 PVA 水泥基复合材料拉压比更大, 进而增强了 PVA 纤维水泥基复合材料的韧性。

3 结论

1) 掺加了 PVA 纤维的立方体试块, 在抗压过程中, 裂缝扩展的路径较多, 裂而不碎, 但 PVA 纤维水泥基复合材料的

抗压强度并无太大变化。30%粉煤灰掺量的水泥基复合材料比 50%粉煤灰掺量的水泥基复合材料抗压强度高出 20% 以上。

2) PVA 纤维掺量的增加大幅度提高了水泥基复合材料的劈裂抗拉强度, 劈裂抗拉强度的增幅为 42.64% ~ 135.12%。粉煤灰的掺入则对劈裂抗拉强度影响不显著。在劈裂试验中 F1~F2 的试块在裂缝贯通后仍未碎成两半, 表现出很强的韧性。

3) 抗压比随着 PVA 纤维掺量的增加而增加, 增幅为 36.82%~134.27%; 和普通混凝土相比较, PVA 纤维水泥基复合材料显著改善了脆性大, 韧性小的缺点。

参考文献:

- [1] Lee B Y, Kim J K, Kim J S. Quantitative evaluation technique of polyvinyl alcohol (PVA) fiber dispersion in engineered cementitious composites [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2009, 31(6): 408-417.
- [2] Li L, Shi H S. Investigation of self-healing behavior of engineered cementitious composites (ECC) materials [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 29(4): 348-356.
- [3] Lepech M D, Li V C. Water permeability of engineered cementitious composites [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2009, 31(10): 744-783.
- [4] Sahmaran M, Li V C. Durability of mechanically loaded engineered cementitious composites under highly alkaline environments [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2008, 30(2): 72-81.
- [5] Yang E H, Li V C. Tailoring engineered cementitious composites for impact resistance [J]. *Cement and Concrete Research*, 2012, 42(8): 1066-1071.
- [6] Li V C, Wang S, Wu C. Tensile strain-hardening behavior of PVA-ECC [J]. *ACI Materials Journal*, 2001, 98(6): 483-492.
- [7] 李贺东. 超高韧性水泥基复合材料试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [8] Sahmaran M, Özbayb E, Yücel H E, et al. Frost resistance and microstructure of engineered cementitious composites: Influence of fly ash and micro poly-vinyl-alcohol fiber [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2012, 34(2): 156-165.
- [9] 徐世焯, 蔡向荣. 超高韧性增强水泥基复合材料基本力学性能 [J]. *水利学报*, 2009, 40(9): 1055-1063.
- Xu S L, Cai X R. Experimental study on mechanical properties of ultra high toughness fiber reinforced cementitious composite [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(9): 1055-1063.
- [10] 李贺东, 徐世焯. 超高韧性水泥基复合材料弯曲性能及韧性评价方法 [J]. *土木工程学报*, 2010, 43(3): 32-39.
- Li H D, Xu S L. Research on flexural properties and flexural toughness evaluation method of ultra high toughness cementitious composites [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2010, 43(3): 32-39.
- [11] 闫长旺, 贾金青, 张菊. 碳纤维增强超高强混凝土抗压比试验研究 [J]. *大连理工大学学报*, 2012, 52(2): 233-238.
- Yan C W, Jia J Q, Zhang J. Experimental study of ratio between splitting tensile strength and compressive strength for steel fiber reinforced ultra high strength concrete [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2012, 52(2): 233-238.
- [12] 夏广政, 夏冬桃, 徐礼华, 等. 混杂纤维增强高性能混凝土抗压比试验研究 [J]. *重庆建筑大学学报*, 2007, 29(5): 103-106.
- Xia G Z, Xia D T, Xu L H, et al. Evaluation of ratio between splitting tensile strength and compressive strength for hybrid fiber reinforced HPC [J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 2007, 29(5): 103-106.
- [13] 徐世焯, 李贺东. 超高韧性水泥基复合材料研究进展及其工程应用 [J]. *土木工程学报*, 2008, 41(6): 46-60.
- Xu S L, Li H D. A review on the development of research and application of ultra high toughness cementitious composites [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2008, 41(6): 46-60.
- [14] 钱红萍, 李书进. 纤维混凝土抗裂性能及其工程应用研究 [J]. *混凝土*, 2011, 260(6): 128-130.
- Qian H P, Li S J. Research on anti-cracking performance and engineering application of fiber reinforced concrete [J]. *Concrete*, 2011, 260(6): 128-130.
- [15] 杜修力, 田予东, 田瑞俊, 等. 碳纤维超高强混凝土的力学性能试验 [J]. *北京工业大学学报*, 2009, 35(9): 1198-1203.
- Du X L, Tian Y D, Tian R J, et al. Experimental research on the mechanical properties of SFRVHC [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2009, 35(9): 1198-1203.
- [16] Behnood A, Ghandehari M. Comparison of compressive and splitting tensile strength of high-strength concrete with and without polypropylene fibers heated to high temperatures [J]. *Fire Safety Journal*, 2009, 44(8): 1015-1022.