

文章编号:1673-2049(2016)03-0104-06

FFRP 加固钢筋混凝土梁的受弯性能

许 颀, 黄 颀

(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:为研究亚麻纤维增强塑料(FFRP)加固钢筋混凝土梁的受弯性能,在4种自然纤维布和3种厚度FFRP试件拉伸试验研究的基础上,以FFRP层数为参数对3根试验梁进行了四点受弯加载试验,并对试验梁的破坏形态、荷载-挠度曲线和极限承载力进行探讨;依据FFRP加固钢筋混凝土梁的最常见破坏模式,对相应破坏模式下的抗弯承载力计算公式进行了推导。结果表明:300 g·m⁻²雨露麻亚麻布制作成的FFRP拉伸性能稳定;FFRP加固梁的极限承载力和延性与普通钢筋混凝土梁相比都有不同程度的提高;抗弯承载力公式计算值与试验值吻合良好且偏于安全,可为该种加固梁的设计提供依据。

关键词:亚麻纤维增强塑料;加固;受弯性能;钢筋混凝土梁

中图分类号:TU375.1 **文献标志码:**A

Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with FFRP

XU Qi, HUANG Liang

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China)

Abstract: In order to study flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with flax fiber reinforced plastic (FFRP), tensile performance tests of FFRP specimens with four kinds of natural fibers and three kinds of thicknesses were conducted. Based on the test results, four-point flexural loading tests on three beams considering FFRP layer as the parameter were carried out. Failure modes of specimens, load-deflection curves and ultimate bearing capacity were investigated. According to the common failure modes of reinforced concrete beams strengthened with FFRP, the corresponding bending capacity formula was derived. The results show that FFRP made of the 300 g·m⁻² rain flax possesses stable tensile properties. Compared with ordinary reinforced concrete beams, ultimate bearing capacity and ductility of beams strengthened with FFRP increase to different extents. The calculation values of bending capacity agree well with the test results, and the results can provide basis for design of this kind of reinforcement beam.

Key words: FFRP; reinforcement; flexural behavior; reinforced concrete beam

0 引言

近年来许多学者对纤维增强塑料(FRP)加固混凝土结构开展了较为深入的研究,取得了很多成

果^[1-4]。然而传统的人造纤维并不能在绿色可持续使用方面有很好的表现,为满足环境保护需求,发展可再生材料,以植物纤维代替玻璃纤维等人造纤维作为复合材料的增强物具有较好的前景。目前,植

收稿日期:2015-10-03

基金项目:国家自然科学基金项目(51078132);湖南省杰出青年基金项目(2015JJ1004)

作者简介:许颀(1989-),男,安徽安庆人,工学硕士研究生,E-mail:huangliangstudy@126.com。

物纤维 FRP 的研究已经越来越受到各国的重视,许多学者进行了相应研究^[5-9]。

文献[10]对亚麻纤维作为复合材料加强纤维的性能进行了分析,提出通过合理的纤维选择与加工处理,亚麻纤维在密度、拉伸强度、断裂伸长及弹性模量等方面具有复合材料应用的潜力。文献[11]进行了真空灌注成型法制作 FFRP 片材的断裂性能研究,指出 FFRP 的断裂性能是纯环氧树脂复合物的 2 倍~4 倍,纤维布中纤维的方向以及纤维的体积分数对断裂性能有较大的影响。这些研究主要集中在材性方面,对于其工程应用研究相对较少。文献[12]首次提出将自然纤维增强塑料用于约束混凝土,并进行了一系列 FFRP 约束混凝土的试验研究,提出了其抗压性能、抗弯性能理论分析模型。

亚麻纤维是人类最早使用的自然纤维之一,是直接人工培植或野生亚麻中提取的,具有可再生、可降解、自重小、价格低等特点,尽管在力学性能方面 FFRP 并不及碳纤维增强塑料(CFRP)和玻璃纤维增强塑料(GFRP)等优越,但是通过增加加固体量的方式仍然可以达到一定的效果。在一些非重要的结构或临时结构等特殊场合,这种再生、环保、廉价的材料具有替代 CFRP 和 GFRP 等的工程应用前景。本文通过材性试验、破坏模式与承载力分析和受弯试验,为 FFRP 加固钢筋混凝土梁的研究应用提供参考。

1 自然纤维布及 FFRP 的拉伸性能试验

1.1 试验材料

在进行胶固化处理之前,对 $200 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 半漂亚麻、 $300 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 雨露亚麻、 $400 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 雨露亚麻和黄麻 4 种自然纤维进行纯纤维布的拉伸性能试验,根据试验结果,选择性能较好的纤维布进行胶固化处理制成自然纤维增强塑料,再测定该种自然纤维增强塑料的拉伸性能。胶固化材料环氧树脂为湖南固特邦土木科技发展有限公司研发的 JN-C3P 改性环氧胶剂,其物理和力学性能见表 1。

表 1 环氧树脂的物理和力学性能

Tab. 1 Physical and Mechanical Properties of Epoxy Resin

材料	型号	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	伸长率/%	密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
环氧树脂胶	JN-C3P	36	6.11	1.81	1.72

注:试件固化条件为 $(23 \pm 7) \text{ } ^\circ\text{C}$, 7 d。

1.2 自然纤维布拉伸性能试验结果及分析

分别制作 $200 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 半漂亚麻布、 $300 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$

雨露亚麻布、 $400 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 雨露亚麻布经向试件 2 个、纬向试件 2 个;肉眼观察黄麻布纬向纤维明显稀疏,只制作黄麻布经向试件 2 个。对以上试件逐个进行拉伸测试,得到的材性应力-应变曲线如图 1 所示。

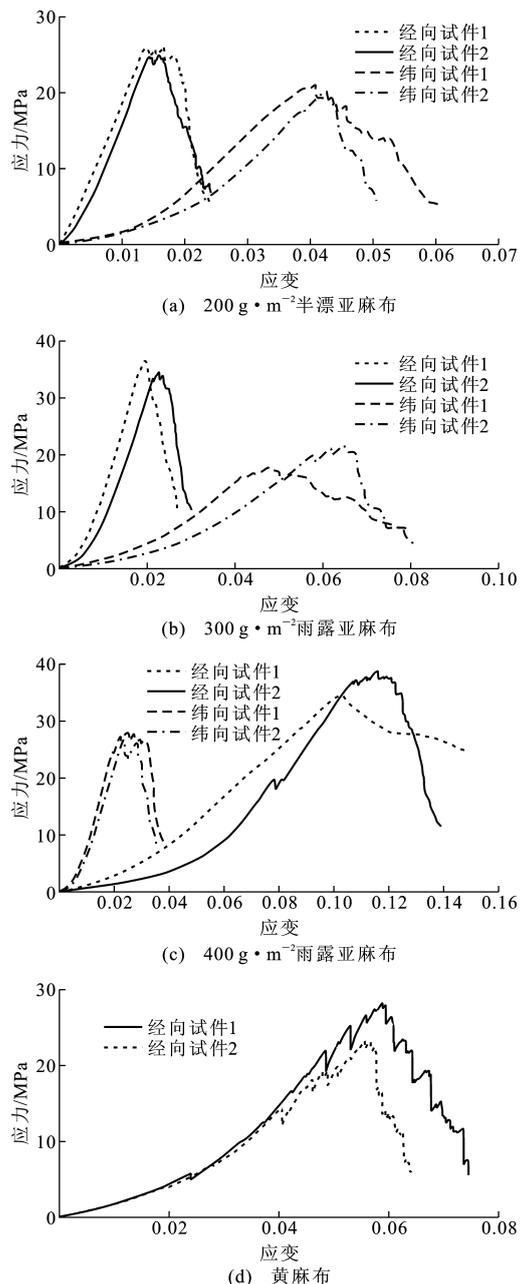


图 1 自然纤维布拉伸曲线

Fig. 1 Tensile Curves of Natural Fiber Cloths

由图 1 可以看出:同种纤维布在经向与纬向上的拉伸性能明显不同;雨露亚麻布试件沿经向的抗拉强度相对较高,强度可达近 40 MPa,但 $400 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 雨露亚麻布试件沿经向拉伸的伸长率过高,能达到 10% 以上。由于编织特点,纤维束在刚开始受拉时会有一个由弯到直的过程,因此开始阶段曲

线相对平缓。综合试验结果,选择 $300 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 雨露亚麻布(经向)作为试验用布进行胶固化处理,制作 FFRP 进行材性分析。

1.3 FFRP 拉伸性能试验结果及分析

用湿粘法分别制作 2 层、4 层和 6 层 FFRP 片材试件各 5 个。逐个进行单向拉伸试验,得到的拉

伸强度、弹性模量和断裂伸长率如表 2 所示。FFRP 片材单向拉伸试验的应力-应变曲线见图 2。

由表 2 可知:2 层、4 层和 6 层 FFRP 的拉伸强度均值分别为 98.8、94.2、84.4 MPa,随着 FFRP 层数的增加,拉伸强度有所下降;FFRP 的初始弹性模量约为 10 GPa,断裂伸长率在 1.8% 左右。

表 2 FFRP 拉伸试验结果

Tab. 2 Tensile Test Results of FFRP

FFRP 层数	试件编号	拉伸强度/MPa	拉伸强度均值/ MPa	初始弹性模量/ GPa	初始弹性模量 均值/GPa	断裂伸长率/%	断裂伸长率 均值/%
2	1	105	98.8	10.213	9.686	1.970	1.746
	2	96		6.504		2.045	
	3	101		10.647		1.668	
	4	93		10.613		1.625	
	5	99		10.451		1.424	
4	1	87	94.2	10.774	10.333	1.672	1.911
	2	96		10.337		1.608	
	3	99		10.277		2.329	
	4	98		9.654		1.867	
	5	91		10.624		2.079	
6	1	90	84.4	10.447	10.552	2.004	1.714
	2	84		9.769		1.630	
	3	87		10.413		1.669	
	4	81		9.895		1.320	
	5	80		12.237		1.945	

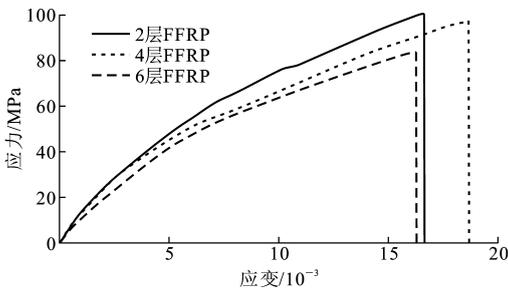


图 2 FFRP 片材拉伸曲线

Fig. 2 Tensile Curves of FFRP Sheet

2 FFRP 加固钢筋混凝土梁的破坏模式及承载力分析

用 FRP 进行受弯加固的钢筋混凝土梁破坏模式主要分为 7 个类型:① FRP 拉断引起的弯曲破坏;② 混凝土压碎引起的弯曲破坏;③ 剪切破坏;④ 混凝土保护层剥离破坏;⑤ FRP 端部界面剥离破坏;⑥ 中部弯曲裂缝引起的界面剥离破坏;⑦ 中部弯剪裂缝引起的界面剥离破坏。

如果 FRP 端部锚固可靠,加固梁达到受弯承载力极限状态取决于 FRP 拉断或受压区混凝土压

碎^[13]。FFRP 拉伸强度远不如 CFRP 那么大,因此 FFRP 加固钢筋混凝土梁最常见的破坏模式有 2 种:① 在混凝土被压坏之前受拉钢筋先屈服,随后 FFRP 被拉断(破坏模式 1);② 在梁底 FFRP 达到其极限拉应变之前钢筋屈服,受压区混凝土被压碎(破坏模式 2)。

2.1 破坏模式 1

这种状态下受压区混凝土未破坏,FFRP 却已达到极限拉应变,此时不能将受压区混凝土直接按照等效应力原则来计算,需要进一步分析受压区混凝土的应力-应变分布。

该种破坏模式应力-应变分布如图 3 所示,其中, h 为梁截面高度, h_0 为受拉钢筋合力作用点至梁受压边缘的距离, a_s 为受拉钢筋作用点至受拉边缘的距离, t_{ff} 为 FFRP 的厚度, b 为梁截面宽度, x_0 为平截面假定确定的受压区高度, ϵ_{cc} 为混凝土受压区边缘压应变, ϵ_{cu} 为混凝土的极限压应变(本文取为 0.003 3), ϵ_s 为受拉钢筋的应变, ϵ_y 为受拉钢筋的屈服应变, ϵ_{ff} 为 FFRP 的应变, ϵ_{ffu} 为 FFRP 的极限应变, F_c 为梁受压区混凝土的合力, F_s 为梁纵向受拉

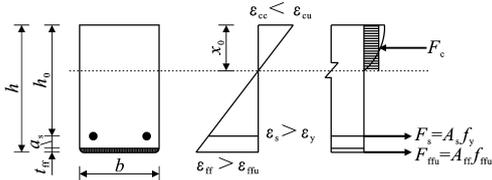


图 3 破坏模式 1 的应力-应变分布

Fig. 3 Stress-strain Distribution of Failure Mode 1

钢筋的合力, A_s 为受拉钢筋截面面积, f_y 为受拉钢筋强度设计值, F_{ffu} 为纤维布的极限合力, A_{ff} 为 FFRP 截面面积, A_{ffu} 为 FFRP 的极限拉应力。截面上不同高度处应变之间的关系为

$$\epsilon_{cc} = \frac{x_0}{h - t_{ff}/2 - x_0} \epsilon_{ffu} \quad (1)$$

根据力的平衡原理有

$$\alpha_1 \frac{x_0}{h - t_{ff}/2 - x_0} \epsilon_{ffu} E_c b x_0 = A_s f_y + \epsilon_{ffu} A_{ff} E_{ff} \quad (2)$$

式中: α_1 为应力折减系数; E_c 为混凝土弹性模量; E_{ff} 为 FFRP 极限拉应变对应的割线弹性模量。

文献[14]根据混凝土本构关系计算求得不同的混凝土受压区边缘压应变 ϵ_{cc} 对应的 α_1 和矩形受压区高度折减系数 β_1 , 并绘制成速查表。假定 x_0 取值, 代入式(1)算出 ϵ_{cc} , 查表得到对应的 α_1, β_1 , 代入式(2), 通过等式两端是否相等来调整 x_0 , 直到等式两端相等为止, 求得 x_0 后梁截面的极限承载力 M 为

$$M = A_s f_y (h - t_{ff} - a_s - \beta_1 x_0 / 2) + f_{ffu} b t_{ff} (h - t_{ff} / 2 - \beta_1 x_0 / 2) \quad (3)$$

2.2 破坏模式 2

若钢筋和 FFRP 的配置量适中, 加固梁可能会出现钢筋屈服, 受压区混凝土被压碎, FFRP 未拉断的破坏情况。

该种破坏模式应力-应变分布如图 4 所示, 其中, f_{ff} 为 FFRP 的拉应力, F_{ff} 为纤维布的合力。截面上不同高度处应变之间的关系为

$$\epsilon_{ff} = \frac{h - t_{ff}/2 - x_0}{x_0} \epsilon_{cu} \quad (4)$$

根据力的平衡原理有

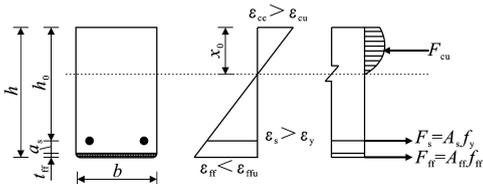


图 4 破坏模式 2 的应力-应变分布

Fig. 4 Stress-strain Distribution of Failure Mode 2

$$\alpha_1 f_c b x_0 = A_s f_y + A_{ff} E_{ff} \epsilon_{cu} \frac{h - t_{ff}/2 - x_0}{x_0} \quad (5)$$

式中: f_c 为混凝土强度设计值。

根据混凝土结构设计规范, 混凝土强度等级不超过 C50 时 $\alpha_1 = 1.0, \beta_1 = 0.8$, 梁截面的极限承载力为

$$M = A_s f_y (h - t_{ff} - a_s - 0.8x_0/2) + f_{ff} b t_{ff} (h - t_{ff}/2 - 0.8x_0/2) \quad (6)$$

3 FFRP 加固钢筋混凝土梁的抗弯试验

3.1 试验概况

本文进行了 3 根试验梁的四点受弯性能验证性试验(图 5), 包括 1 根对比梁 CB1 和 2 根 FFRP 加固梁 FB1, FB2。试验梁设计截面尺寸为 150 mm × 300 mm, 计算长度为 1 800 mm, 混凝土设计强度为 C30, 梁底纵向钢筋为 2 Φ 12, 箍筋为 Φ 8 @ 150 (2)。FB1 梁底采用 4 层 FFRP 加固, FB2 梁底采用 6 层 FFRP 加固。



图 5 加载试验

Fig. 5 Loading Test

3.2 试件破坏过程及形态

2 根 FFRP 加固钢筋混凝土梁的受弯破坏过程基本相同, 大致可以分为混凝土开裂、裂缝发展和 FFRP 拉断 3 个阶段。加载初期梁处于弹性状态, FFRP、钢筋和混凝土能很好地协同工作。加载到约 $0.2P_u$ (P_u 为极限荷载) 时梁中部混凝土开裂, 梁开始进入裂缝发展阶段。随着荷载的增加, 裂缝逐渐增多且呈现对称分布。加载到 $(0.6 \sim 0.7)P_u$ 时, 出现剪切裂缝。继续加载至接近 $0.9P_u$ 时, 出现混凝土与 FFRP 的剥离裂缝, 并开始出现细小的纤维受拉发出的清脆响声, 最终 FFRP 拉断, 试件破坏。梁的最终破坏形态见图 6。

3.3 荷载-挠度曲线

不同加固条件下各梁的荷载-挠度曲线如图 7 所示。由图 7 可以看出, 在加载初始阶段, 梁处于弹性工作状态, 钢筋未屈服, 各梁的荷载-挠度曲线基本重合且呈线性变化。对比梁 CB1 在线性阶段之后不久达到峰值荷载, 曲线开始下降。加固梁 FB1,

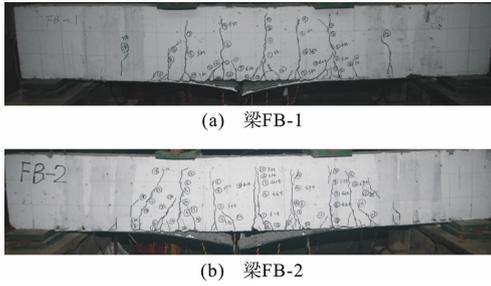


图6 梁最终破坏形态

表4 抗弯承载力试验值与计算值比较

Tab. 4 Comparison Between Experiment Values and Calculation Values of Bending Bearing Capacity

梁编号	$P_{u,T}/\text{kN}$	$P_{u,c}/\text{kN}$	$P_{u,c}/P_{u,T}$
FB1	164.3	151.2	0.92
FB2	172.3	165.4	0.96

注： $P_{u,T}$ 为试验极限荷载； $P_{u,c}$ 为计算极限荷载。

显不同； $300\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 雨露亚麻布试件与 $400\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 雨露亚麻布试件沿经向的抗拉强度相对较高； $400\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 雨露亚麻布试件沿经向拉伸的伸长率过高，能达到10%以上，而 $300\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 雨露亚麻布试件沿经向拉伸的伸长率适中。

(2) $300\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 雨露亚麻布(经向)制作成的FFRP试件拉伸性能较为稳定，随着FFRP层数的增加，拉伸强度有所降低，初始弹性模量约为10 GPa，断裂伸长率在1.8%左右。

(3) FFRP加固钢筋混凝土梁的荷载-挠度曲线在线性阶段之后趋于平缓上升状态，最后FFRP被拉断，荷载下降到比普通钢筋混凝土梁峰值荷载略低的位置。这表明FFRP加固对钢筋混凝土梁的延性有较显著的提高。

(4) 与普通钢筋混凝土梁相比，FFRP加固钢筋混凝土梁的极限承载力都有不同程度的提高。加固4层FFRP的承载力提高了16.5%；加固6层FFRP的承载力提高了22.2%。

(5) 对于FFRP加固钢筋混凝土梁常见破坏模式的抗弯承载力计算公式，计算值与验证性试验值吻合良好且偏于安全。鉴于试件数量有限，将通过进一步的试验，得到该种加固梁设计计算的更多依据。

参考文献：

References:

- [1] 叶列平, 冯鹏. FRP在工程结构中的应用与发展[J]. 土木工程学报, 2006, 39(3): 24-36.
YE Lie-ping, FENG Peng. Applications and Development of Fiber-reinforced Polymer in Engineering Structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(3): 24-36.
- [2] 吕志涛. 高性能材料FRP应用与结构工程创新[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(1): 1-5.
LU Zhi-tao. Application of High Performance FRP and Innovations of Structure Engineering[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1): 1-5.
- [3] 曹双寅, 邱洪兴, 滕锦光, 等. 纤维加固受弯构件全过

Fig. 6 Final Failure Patterns of Beams

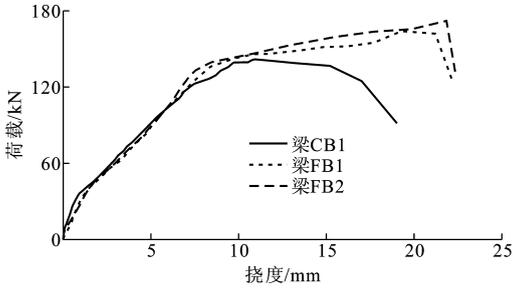


图7 荷载-挠度曲线

Fig. 7 Load-deflection Curves

FB2在线性阶段之后，曲线趋于平缓上升状态，最后FFRP被拉断，荷载下降到比梁CB1峰值荷载略低的位置。这说明FFRP加固对钢筋混凝土梁的延性有较显著提高。

3.4 试验结果分析

FFRP加固钢筋混凝土梁的加载试验结果如表3所示。从表3可以看出，FFRP加固梁的极限承载力与普通钢筋混凝土梁相比都有不同程度的提高。加固4层FFRP的梁FB1承载力为164.3 kN，提高了16.5%；加固6层FFRP的梁FB2承载力为172.3 kN，提高了22.2%。

表3 试验结果

Tab. 3 Test Results

梁编号	P_c/kN	P_Y/kN	P_U/kN	破坏模式
CB1	36.3	79.7	141.0	混凝土被压碎
FB1	36.3	93.0	164.3	FFRP被拉断
FB2	39.7	95.0	172.3	FFRP被拉断

注： P_c 为混凝土开裂时的荷载； P_Y 为钢筋屈服时的荷载。

采用本文公式对2根加固试验梁的抗弯承载力进行计算，并与试验值进行比较，结果见表4。

由表4可知，加固试验梁破坏时计算极限荷载值均比试验极限荷载值略小，说明计算方法是合理可行的。由于FFRP参数选取上容易产生一定误差，故存在一定偏差属正常现象。

4 结语

(1) 同种纤维布在经向和纬向上的拉伸性能明

- 程分析和承载力计算[J]. 工业建筑, 2000, 30(10): 27-30, 43.
- CAO Shuang-yin, QIU Hong-xing, TENG Jin-guang, et al. Load-deformation Process and Strength of Flexural Members Strengthened with GFRP Composite [J]. Industrial Construction, 2000, 30(10): 27-30, 43.
- [4] 贺拴海, 任 伟. 纤维增强塑料加固混凝土结构研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(3): 20-24.
- HE Shuan-hai, REN Wei. Research on Reinforced Concrete Structure with FRP[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(3): 20-24.
- [5] SAHEB D N, JOG J P. Natural Fiber Polymer Composites: A Review[J]. Advances in Polymer Technology, 1999, 18(4): 351-363.
- [6] LI X, TABIL L G, PANIGRAHI S, et al. The Influence of Fiber Content on Properties of Injection Molded Flax Fiber-HDPE Biocomposites[J]. Canadian Biosystems Engineering, 2009, 8(148): 1-10.
- [7] LIU Q, STUART T, HUGHES M, et al. Structural Biocomposites from Flax — Part II: The Use of PEG and PVA as Interfacial Compatibilising Agents[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2007, 38(5): 1403-1413.
- [8] 曾竟成, 肖加余, 梁重云, 等. 黄麻纤维增强聚合物复合材料工艺与性能研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2001(2): 30-33.
- ZENG Jing-cheng, XIAO Jia-yu, LIANG Chong-yun, et al. Study of Processing and Properties of Jute Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Materials[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2001(2): 30-33.
- [9] 郑 融, 洗杏娟, 叶颖薇, 等. 黄麻纤维/环氧复合材料及其性能分析[J]. 复合材料学报, 1995, 12(1): 18-25.
- ZHENG Rong, XIAN Xing-juan, YIPP W M, et al. Analysis and Properties of Jute/Epoxy Composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 1995, 12(1): 18-25.
- [10] 王惠民. 亚麻纤维加强复合材料的纤维性能研究[J]. 麻纺织技术, 1998, 21(增): 19-21.
- WANG Hui-min. Fiber Properties of Flax Fiber Reinforced Composites [J]. Bast Textile Technology, 1998, 21(S): 19-21.
- [11] LIU Q, HUGHES M. The Fracture Behaviour and Toughness of Woven Flax Fibre Reinforced Epoxy Composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2008, 39(10): 1644-1652.
- [12] YAN L, CHOUW N. Compressive and Flexural Behaviour and Theoretical Analysis of Flax Fibre Reinforced Polymer Tube Encased Coir Fibre Reinforced Concrete Composite[J]. Materials & Design, 2013, 52(24): 801-811.
- [13] 滕锦光, 陈建飞, SMITH S T, 等. FRP加固混凝土结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- TENG Jin-guang, CHEN Jian-fei, SMITH S T, et al. FRP Strengthened RC Structures[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004.
- [14] 龚 畅. FRP加固混凝土结构受力性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
- GONG Chang. Mechanical Behavior of FRP Reinforced Concrete Structure[D]. Changsha: Hunan University, 2011.