复 合 材 料 学 报　　第 20 卷　第 6 期　12 月　2003 年
ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA　　Vol. 20　No. 6　December　2003

文章编号: 1000-3851(2003)06-0047-05

混凝土结构用 CFRP 筋的感知性能试验研究

欧进萍[1]，王　勃[1]，张新越[1]，何　政[1]，钱民中[2]
(1.哈尔滨工业大学 土木工程学院，哈尔滨 150090；2.哈尔滨玻璃钢研究院，哈尔滨 150036)

摘　要：对混凝土结构用 CFRP 筋及其加筋混凝土梁的力学性能和感知性能进行试验研究。自行研制开发了不同直径和表面处理形式的 CFRP 筋。在此基础上，制作了三组各 6 个标准受拉试件，分别测试了 CFRP 筋的弹性模量、极限抗拉强度和电阻变化率，得到了相应的变化曲线；其次制作了两组各 3 根 CFRP 加筋混凝土梁，测试了梁中 CFRP 筋电阻随载荷增加的变化曲线。研究表明，CFRP 筋具有很好的力学性能和感知性能，对于混凝土结构加强筋和结构受力状态监测具有广泛的应用前景。

关键词：CFRP 筋；力学性能；感知性能；混凝土梁
中图分类号：TB332；TU375；TU599　　**文献标识码**：A

EXPERIMENTAL STUDY ON SELF-SENSING PROPERTIES OF CFRP BARS FOR CONCRETE STRUCTURES

OU Jinping[1], WANG Bo[1], ZHANG Xinyue[1], HE Zheng[1], QIAN Minzhong[2]
(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;
2. Harbin Fiber Reinforced Plastic Institute, Harbin 150036, China)

Abstract: This paper presents test results on the mechanical and self-sensing properties of CFRP bars and concrete beams reinforced with CFRP bars. The CFRP bars were produced in different diameters and with different surface treatments. Eighteen CFRP bar specimens in three series are tested for elastic modulus, ultimate tensile strength and electrical resistance change. Six concrete beams reinforced with CFRP bars under third-point loading were tested. The curves of electrical resistance change of CFRP bars in concrete beams versus load were presented. The test results show that CFRP bars can be used as reinforcement and monitor the concrete structures mechanical properties.

Key words: CFRP bars; mechanical properties; self-sensing properties; concrete beams

传统的钢筋混凝土结构在桥梁、路面、海洋结构及其他恶劣环境条件下严重退化的主要原因是钢筋锈蚀。混凝土结构中钢筋在氯离子、高湿度、高温度和海洋大气中锈蚀严重。环氧涂层、阴极保护、增加混凝土保护层厚度、聚合物混凝土等措施未能提供长期理想的解决办法[1, 2]。碳纤维聚合物筋(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)的耐腐蚀特点为解决锈蚀问题提供了新的途径[3]。

CFRP 筋既具有结构材料优良的力学性能，又具有功能材料的感知特性，因此它既能用作受力筋又能作为传感器[4]。CFRP 筋的感知特性主要反映在其受力变形过程中电阻发生变化，已有一些学者对这一特性进行了初步的研究[5~8]。

1　CFRP 筋研制

哈尔滨工业大学和哈尔滨玻璃钢研究院联合研制开发的 CFRP 筋是由 T700 碳纤维束浸渍在环氧树脂中，通过拉挤模具成形、并经过高温固化而成。为增强 CFRP 筋与混凝土的粘结，对 CFRP 筋进行表面处理，常用的表面处理形式有螺旋缠绕纤维束、粘砂、刻痕[9]。本文中研究用的 CFRP 筋表面处理形式是螺旋缠绕玻璃纤维束，碳纤维体积含量为

收稿日期：2003-03-17；收修改稿日期：2003-07-21
基金项目：国家自然科学基金资助项目(50208007)
通讯作者：欧进萍，教授，主要从事结构振动控制和结构健康监测研究　E-mail: oujinping@hit.edu.cn

64%, 环氧树脂体积含量为 36%。在拉挤过程中, 碳纤维通过 1.2 m 长的拉挤模具, 模具温度为 220℃, 拉出速率为 25 cm/ min[10]。

2　CFRP 筋受拉力学性能

2.1　受拉标准试件

CFRP 筋受拉标准试件是按照拉挤玻璃纤维增强塑料杆力学性能试验方法[11]加工制作的。在进行受拉试验之前, 先测量试件的直径和长度。试验采用 50 kN 万能材料试验机, 荷载传感器采集荷载, 25 mm引伸计测量试件纵向变形。试件加载速率为 1 mm/ min。试验单调加载直到试件断裂停止。CFRP 筋受拉试验装置如图 1 所示。

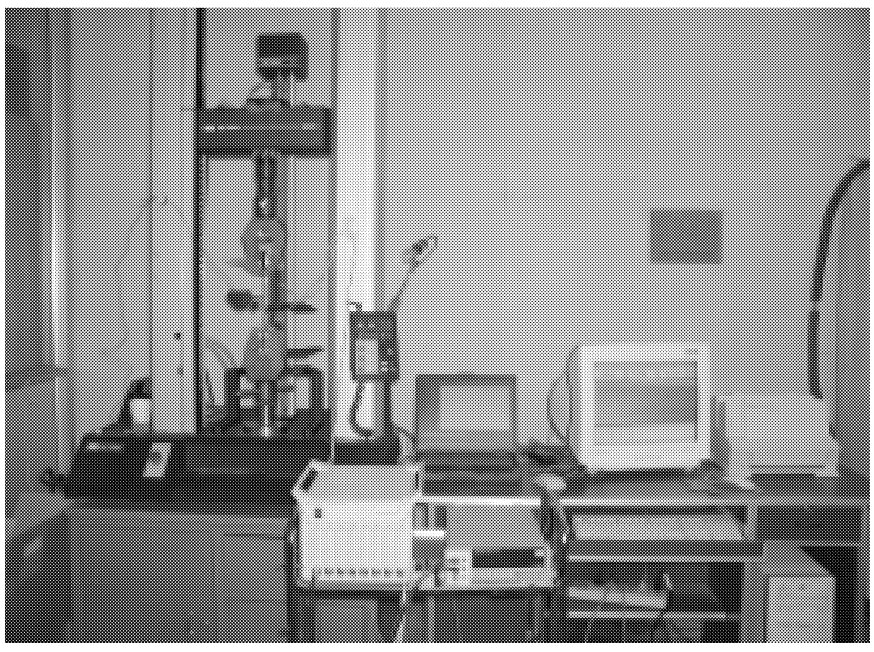


图 1　CFRP 筋受拉试验装置

Fig. 1　The tensile test setup of CFRP bars

2.2　受拉试验结果

CFRP 筋的应力-应变曲线直到破坏是线弹性的, 最后是脆性破坏, 如图 2 所示。表 1 是 12 根 CFRP 筋的受拉试验结果, 其平均抗拉强度为 1596 MPa, 是普通钢筋的 3.19 倍; 平均弹性模量为 128.34 GPa, 是普通钢筋的 64%。

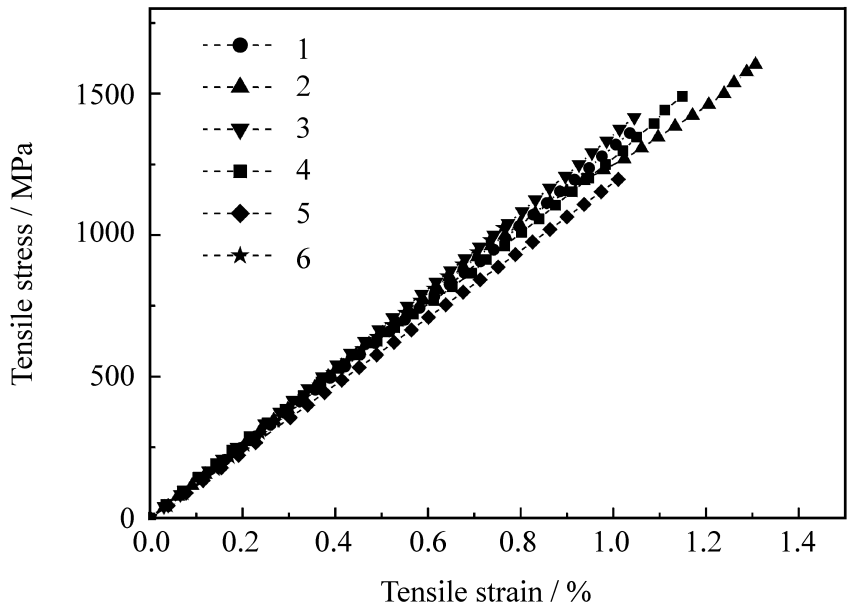


图 2　CFRP 筋受拉应力-应变曲线

Fig. 2　Tensile stress-strain curves of the CFRP bars

3　CFRP 筋的感知性能

3.1　CFRP 筋的感知性能试验

测试 CFRP 筋感知性能的试件直径 4 mm, 长 300 mm。在试验段用导电胶粘铜箔, 改善铜箔与导电碳纤维的导电性。两个铜箔间距约为 120 mm。表 2 是 CFRP 筋感知性能试验数据。试件加载速度为 1 mm/ min, 用 25 mm 引伸计测量试件拉应变。试件两个铜箔间的初始电阻和电阻变化值用多功能万用表测量。一般混凝土结构用 CFRP 筋的使用环境温度为常温, 试验在室温(约 20℃)条件下进行。

3.2　CFRP 筋试验结果及分析

CFRP 筋的感知性能就是利用碳纤维的压阻效应来监测筋的应变和断裂。碳纤维电阻变化主要有以下原因: 弹性变形产生的几何变化; 碳纤维间电子交换产生电阻率变化; 碳纤维相互接触产生电阻率变化; 碳纤维断裂[12]。图 3 是 CFRP 筋电阻变化率-应变曲线。最初电阻变化是由于碳纤维弹性变形产

表 1　CFRP 筋受拉试验结果

Table 1　Tensile experimental results of the CFRP bars

No. of specimens	Diameter/ mm	Ultimate tensile strength / MPa	No. of specimens	Diameter/ mm	Modulus of elasticity / GPa
1	4.93	1594	7	5.82	131.45
2	5.07	1603	8	5.91	122.02
3	4.75	1697	9	5.71	135.55
4	4.64	1657	10	5.95	126.59
5	4.86	1361	11	5.98	118.68
6	4.97	1664	12	6.05	135.75
Average		1596	Average		128.34

表 2 CFRP 筋的感知性能试验结果

Table 2 Sensing properties experimental results of the CFRP bars

No. of specimens	Diameter /mm	Distance between copper foil/mm	Initial electrical resistance R_0/Ω	$(R-R_0)/R_0$ /%
1	3.93	113	0.472	31.99
2	4.07	118	0.507	35.11
3	3.91	116	0.407	44.96
4	3.64	122	0.680	39.85
5	3.79	123	0.454	31.28
6	3.86	121	0.531	39.55

生的, 曲线斜率类似应力-应变曲线, 是线性的[13]。随着应变增加, 碳纤维间相互接触产生电阻率变化, 曲线斜率逐渐偏离线性。到临近破坏时, 部分碳纤维断裂, 电阻值明显增加, 曲线斜率急剧增加。CFRP 筋断裂时电阻变化率为 30%～45%。

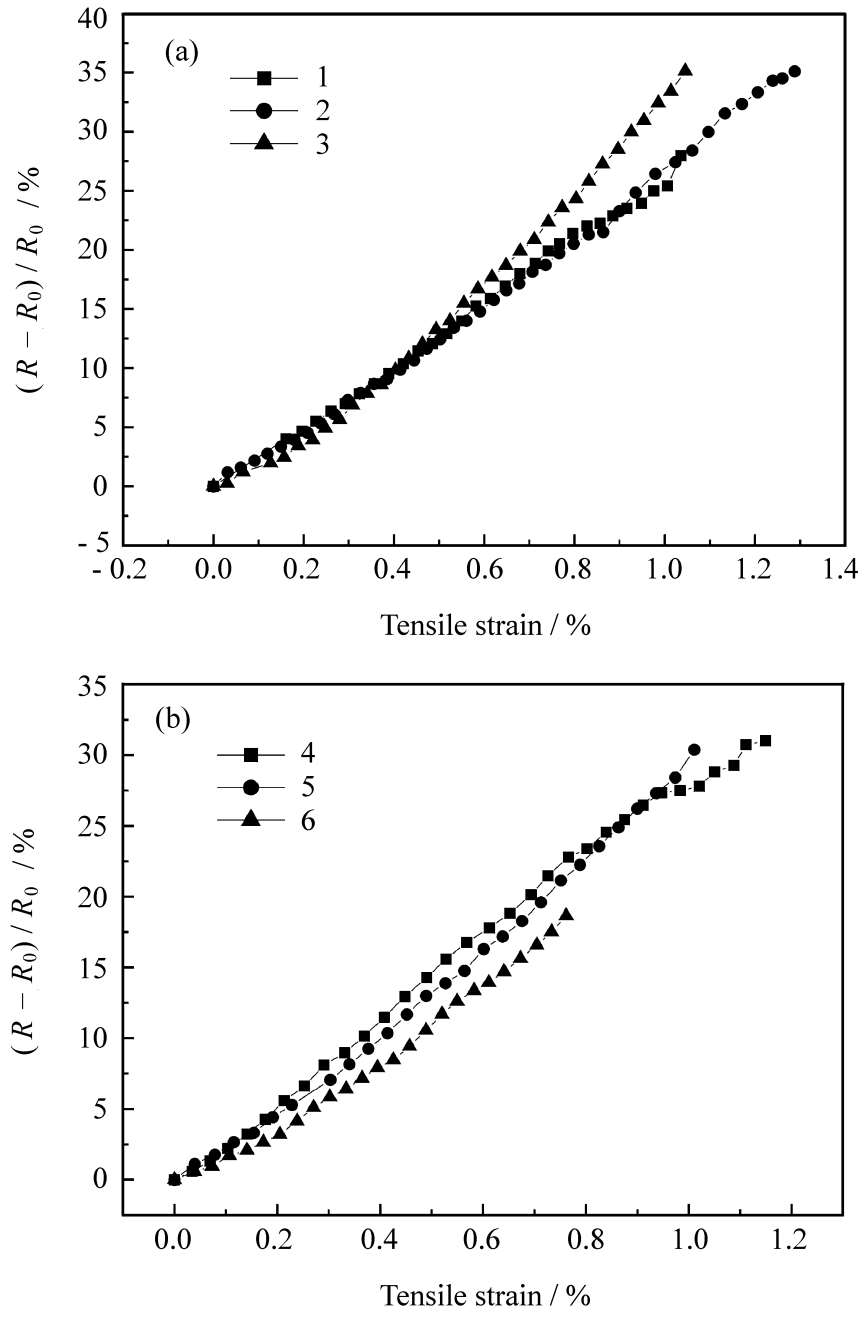


图 3 CFRP 筋电阻变化率-拉应变曲线

Fig. 3 Electrical resistance change-tensile strain curves of the CFRP bars

4 CFRP 加筋混凝土梁的感知性能

4.1 CFRP 加筋混凝土梁试件

制作了两组共计 6 根 2.1 m 长混凝土梁, 梁截面为 100 mm×200 mm, 混凝土保护层为 15 mm。第一组梁用的 CFRP 筋表面是螺旋缠绕纤维束, 第二组梁用的 CFRP 筋表面是螺旋缠绕纤维束并粘砂。梁下部纵向筋为 3 根直径的 4 mm CFRP 筋, 上部为 2 根直径 3.2 mm 的钢筋。直径 6 mm 钢箍筋间距50 mm防止剪切破坏。

梁受三分点加载, 在梁支座和跨中分别放置 3 个位移传感器测量混凝土梁的变形。使用螺旋千斤顶分级加载, 用荷载传感器测量荷载。用精密电子万用表测量 CFRP 筋电阻。在每一步加载, 记录荷载、跨中变形和 CFRP 筋电阻值, 混凝土梁试验装置如图 4 所示。

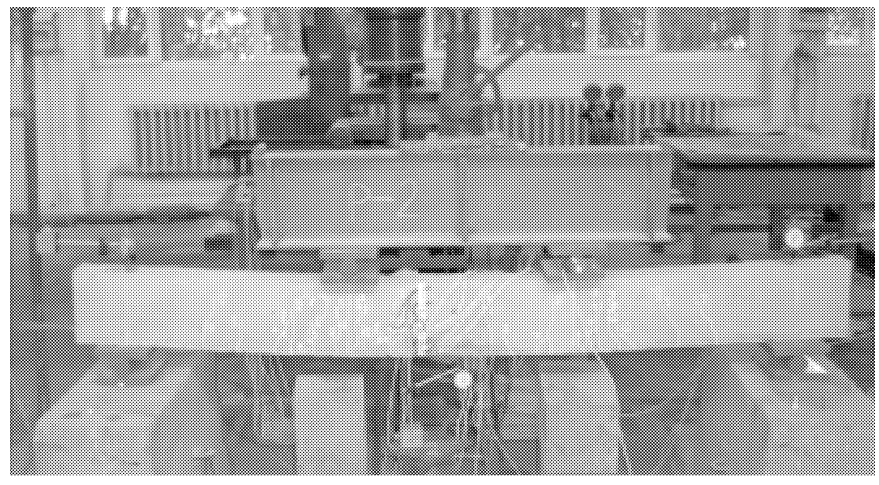


图 4 CFRP 加筋混凝土梁试验装置

Fig. 4 The test setup of a concrete beam reinforced with the CFRP bars

4.2 CFRP 加筋混凝土梁试验结果及讨论

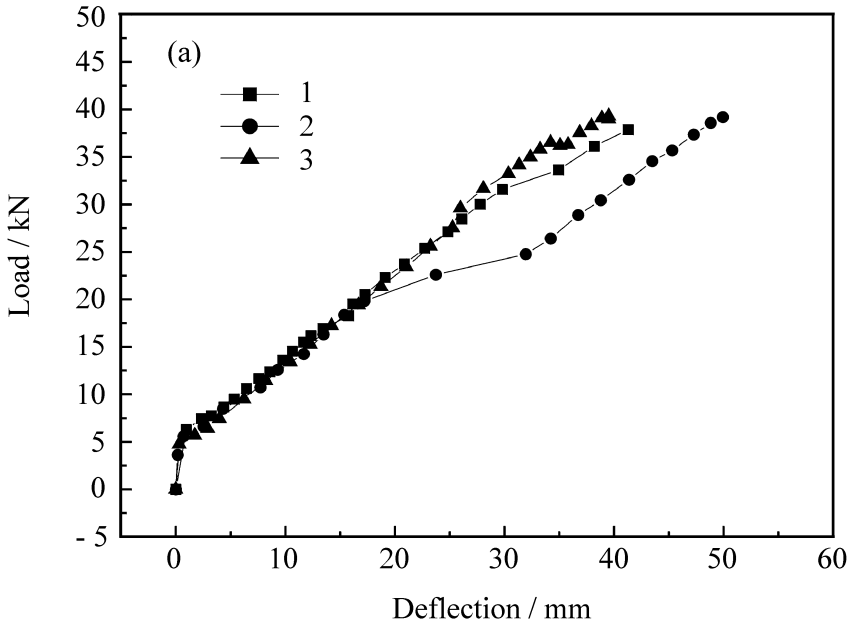
图 5 是混凝土梁载荷-变形曲线。开始加载时梁未开裂, 刚度较大, 随着荷载增加, 当作用弯矩超过开裂弯矩时首先在跨中出现垂直裂缝, 引起梁刚度减少。表 3 是 CFRP 加筋混凝土梁试验结果。

表 3 CFRP 加筋混凝土梁试验结果

Table 3 Experimental results of the concrete beams reinforced with the CFRP bars

No. of beams	Ultimate load/kN	Initial electrical resistance R_0/Ω	$(R-R_0)/R_0$/%
1	45.81	9.11	5.99
2	41.06	9.05	6.74
3	38.07	9.70	5.74
4	36.11	6.72	3.96
5	35.69	8.65	4.07
6	39.30	8.33	4.00

混凝土梁中 CFRP 筋电阻变化率-荷载曲线如图 6 所示。CFRP 筋电阻变化率随荷载的增加而增加, 当荷载增加到最大值, 混凝土梁破坏时, CFRP



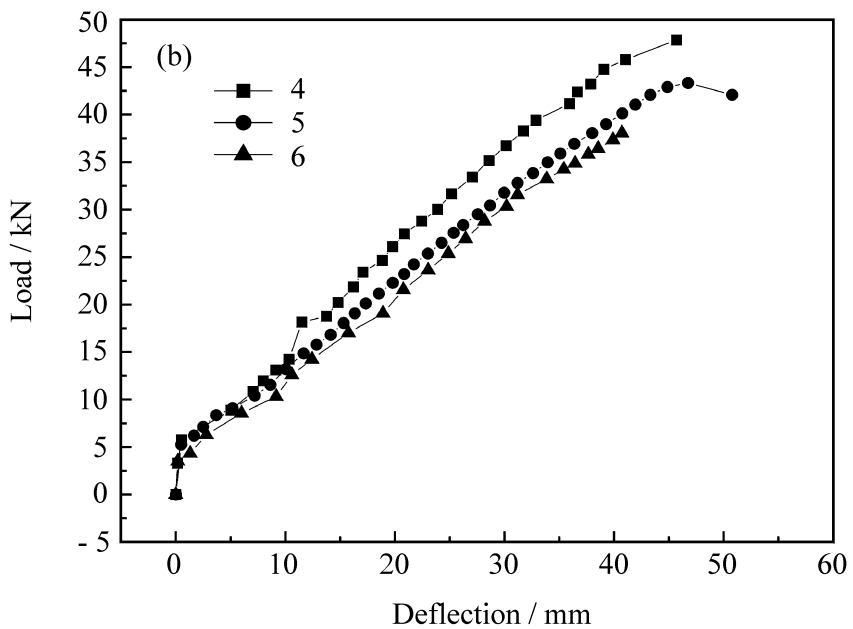
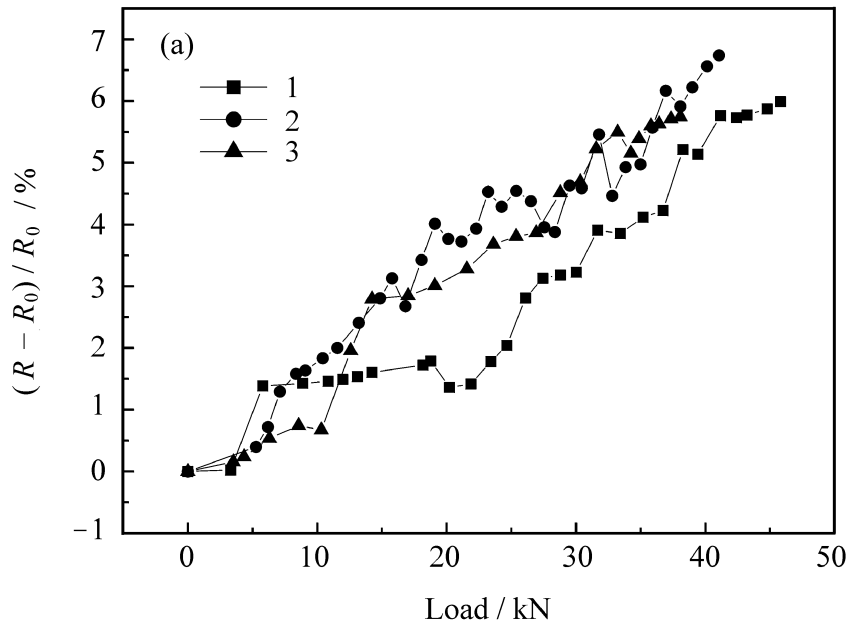


图 5　CFRP 加筋混凝土梁荷载-变形关系

Fig. 5　Load-deflection relationship of the concrete beams reinforced with the CFRP bars



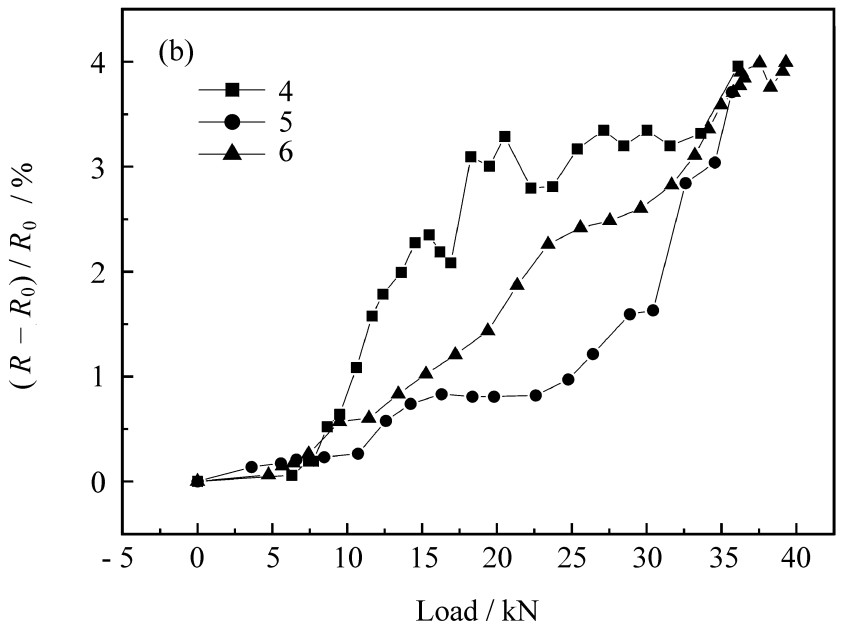


图 6　CFRP 加筋混凝土梁电阻变化率-荷载曲线

Fig. 6　Resistance change-load curves of the concrete beams reinforced with the CFRP bars

筋电阻达到最大值。混凝土梁中 CFRP 筋电阻由一个纯弯段和两个弯剪段三部分电阻组成。最初电阻变化是由于碳纤维弹性变形,随着荷载的增加,碳纤维间相互接触导致电阻率变化,最后 CFRP 筋中部分碳纤维断裂,使电阻继续增加。

混凝土梁的破坏是混凝土压碎,而 CFRP 筋未拉断,CFRP 筋电阻变化率为 3. 96% ～6. 74%,是 CFRP 筋受拉试验值的 20%。这是由于 CFRP 筋在三分点受弯混凝土梁中应力分布不是常数。在中间 1/ 3 处是纯弯段,CFRP 筋应力是最大值;而在两端各 1/ 3 处 CFRP 筋应力是从端部的零值逐渐增加到最大值。

5　结　论

本文中研究 CFRP 筋及其加筋混凝土梁的力学性能和感知性能,基于试验结果得到以下结论

(1) CFRP 筋受拉直到破坏是线弹性的,其破坏形式是脆性的。极限抗拉强度为 1621 MPa,是普通钢筋的 3. 19 倍。弹性模量为 128. 38 GPa,是普通钢筋的 64%。

(2) CFRP 筋受拉破坏时电阻变化率为 30% ～45%,电阻变化率-拉应变曲线的斜率随应变增加而明显增加。

(3) 混凝土梁中 CFRP 筋的电阻变化率为 3. 96% ～6. 74%,是 CFRP 筋受拉时的 20%。受弯混凝土梁中 CFRP 筋应力不是常数导致电阻变化率减小,混凝土梁破坏形式是混凝土压碎,而 CFRP 筋未拉断。

(4) 基于 CFRP 筋的力学性能和感知性能,CFRP 筋既能用作混凝土结构的受力筋,又能对结构受力状态进行监测,是一种很有前途的新型智能材料。

参考文献:

[1] ACI 440. Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars [R]. American Concrete Institute, 2001.

[2] Benmokrane B, Chaallal O, Masmoudi R. Flexural response of concrete beams reinforced with FRP reinforcing bars [J]. ACI Structural Journal, 1995, 91(2): 46- 55.

[3] 王 勃, 何 政, 张新越, 等. 纤维聚合物筋在土木工程中的应用 [J]. 建筑技术, 2003, 34(2): 134- 135.

[4] Maalej M, Karasaridis A, Pantazopoulou S, et al. Structural health monitoring of smart structures [J]. Smart Materials and Structures, 2002, 11: 581- 589.

[5] Chung D D L. Strain sensors based on the electrical resistance change accompanying the reversible pull-out of conducting short fibers in a less conducting matrix [J]. Smart Materials and Structures, 1995, 4: 59- 61.

[6] Wang X, Chung D D L. Continuous carbon fibre epoxy-matrix composite as a sensor of its own strain [J]. Smart Materials and structures, 1996, 5: 796- 800.

[7] Irving P E, Thiagarajan C. Fatigue damage characterization in carbon fibre composite materials using an electrical potential technique [J]. Smart Materials and Structures, 1998, 7: 456 - 466.

[8] Schulte K, Baron C. Load and failure analyses of CFRP laminates by means of electrical resistivity measurements [J]. Composite Science and Technology, 1989, 36: 63- 76.

[9] 张新越. FRP 筋及其混凝土构件的力学性能与感知特性 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2002.

[10] Ou J P, Wang B, He Z, et al. Mechanical and sensing properties of FRP bars for concrete structures [J]. Pacific Science Review, 2002, 4: 93- 99.

[11] GB/T 13096.1- 91. 拉挤玻璃纤维增强塑料杆力学性能试验方法 [S].

[12] Bakis C E, Nanni A, Terosky J A, et al. Self-monitoring, pseudo-ductile, hybrid FRP reinforcement rods for concrete applications [J]. Composite Science and Technology, 2001, 61: 815- 823.

[13] 沈 烈, 益小苏. 一个单向碳纤维增强树脂基复合材料导电结构模型 [J]. 复合材料学报, 1998, 15(3): 66- 70.