复合材料学报 第23卷 第2期 4月 2006年
Acta Materiae Compositae Sinica Vol. 23 No. 2 April 2006

文章编号: 1000-3851(2006)02-0093-06

混杂型高模量高韧性复合材料加强筋

崔益华*[1], NORUZIAAN Bahman[2], LEE Stephen[3], CHANG Moe[2], 陶 杰[1]
(1. 南京航空航天大学 材料科学与技术学院, 南京 210016; 2. 香港科技大学 土木工程系, 香港;
3. 香港科技大学 先进工程材料实验所, 香港)

摘 要: 针对现有复合材料加强筋存在的弹性模量低、断裂延伸率小、成本高等问题, 以成本低廉的钢纤维作为主要增强材料, 建立了一种新型混杂型复合材料加强筋的理论模型。分别制备了玻璃纤维复合材料加强筋和新型混杂型复合材料加强筋试样, 测试并分析了其单轴拉伸行为, 并进行了加速腐蚀试验。结果表明: 这种新型混杂型复合材料加强筋的弹性模量达 142 GPa, 与玻璃纤维复合材料加强筋相比, 具有耐腐蚀、韧性好、成本低的特点。

关键词: 混杂复合材料; 加强筋; 韧性; 模量
中图分类号: TB332 **文献标识码**: A

High modulus and ductile hybrid composite rebar

CUI Yihua*[1], NORUZIAAN Bahman[2], LEE Stephen[3], CHANG Moe[2], TAO Jie[1]
(1. College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Department of Civil Engineering, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, China; 3. Advanced Engineering Material Facility, Hong Kong, China)

Abstract: A new theoretical model of the hybrid composite rebar is proposed to counter the disadvantages such as low elastic modulus, low elongation after break and high cost of current composite rebars. The glass composite rebars and hybrid composite rebars were fabricated. The single axial tensile behavior and accelerating corrosion properties were tested and analyzed. The results show that the tensile modulus of the new hybrid rebar is 142 GPa. Compared with the glass composite rebar, the new hybrid composite rebars possess the characteristics of corrosion resistance, good ductility and low cost.

Keywords: hybrid composite; rebar; ductility; modulus

复合材料加强筋(CR)由于具有良好的耐腐蚀性能和寿命长的特点, 在混凝土结构补强中正发挥着越来越重要的作用[1,2]。第一代 CR 是单一纤维增强的复合材料如玻璃纤维加强筋(GFCR)、碳纤维加强筋(CFCR)、芳纶纤维加强筋(KFCR)等。此类复合材料加强筋存在的主要问题是在服役过程中没有延展性, 复合材料失效前缺乏预警作用; 另一缺点是其抗拉模量很低, 通常 GFCR 的抗拉弹性模量只有 40～50 GPa, 仅为钢筋(SR)的 1/4～1/5。

第二代 CR 是通过两种或两种以上的增强纤维进行混杂, 制成混杂型复合材料加强筋(HCR), 利用两种增强纤维不同的断裂应变获得伪延展行为(Pseudoductility), 其中断裂应变小的纤维首先失效, 由断裂应变大的纤维继续承担载荷, 直至完全破坏。例如 Phelan 和 Triantafillou[3]通过玻璃纤维与碳纤维的混杂, 获得了双线性应力-应变关系(应力-应变关系曲线上出现两次线性变化)。在该模型横截面上, 玻璃纤维位于芯部, 碳纤维位于外部, 纤维束间以环氧树脂黏结, 从而将易受碱性介质浸蚀的玻璃纤维与混凝土隔离, 阻止了玻璃纤维与碱性介质的接触; Bakis[4]等采用玻璃纤维、芳纶纤维、碳纤维、维尼纶纤维制成了一种 HCR, 他们发现将高模量的纤维尽可能均匀分布在整个横截面上可以获得最佳的伪延展行为; Belarbi[5]从理论角度

收稿日期: 2005-04-28; **收修改稿日期**: 2005-08-31
基金项目: 香港研究基金委员会(RGC) (DAG03/04. EG41)
通讯作者: 崔益华, 副教授, 主要从事功能复合材料和混杂复合材料的研究 E-mail: cuiyh@nuaa.edu.cn

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

得出由不同刚度和不同应变的脆性纤维组成的混杂型加强筋(HCR),也可以获得伪延展行为。此外还有 Bader[6]、Kretsis[7]、Qiu[8]、Bunsell[9]等研究的混杂型复合材料加强筋,在一定程度上均能够获得伪延展行为。

HCR 解决了单一型 CR 存在的无延展行为的缺点,然而与传统的钢筋相比,HCR 仍然存在拉伸弹性模量低、成本高的缺点,特别是需要选用高模量的碳纤维,会大大增加材料成本,将其用于混凝土结构的增强很难进行推广应用。

本研究中以成本低廉的钢纤维作为主要增强材料,通过优化设计和计算,建立了一种新的混杂型复合材料加强筋(NHCR, new hybrid composite rebar)的理论模型。采用手工法制备了复合材料试样,测试了其单轴拉伸行为,并进行了加速腐蚀试验,获得了一种高模量、高韧性、低成本的混杂型复合材料加强筋。

1　理论模型的建立

获得高模量的复合材料加强筋可以通过选用模量高的纤维来实现。在所有高性能纤维中,模量大于钢纤维的只有为数不多的几种,然而其价格往往十分昂贵。例如高模量碳纤维的价格是普通钢纤维的数百倍。鉴于此,本研究中以钢纤维作为基本增强材料,其弹性模量超过 200 GPa,而且成本非常低,且钢纤维具有良好的延展行为。钢纤维存在的主要问题是在强碱性(pH 12～13)的混凝土介质中很容易腐蚀破坏,使用寿命较短。因此需要与其他耐碱性良好的纤维和树脂进行复合。图 1 是一种新型混杂型复合材料加强筋(NHCR)的理论模型。

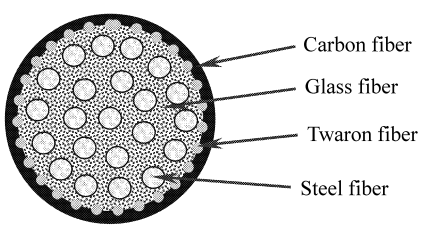

图 1　新型混杂型复合材料加强筋的理论模型

Fig. 1　Theoretical model of the new hybrid composite rebar

该模型具有如下特点:(1) 增强材料以钢纤维为主,从而大大降低了复合材料加强筋的成本。(2) 钢纤维由传统的单根、大直径纤维改为多根、小直径纤维,提高了钢纤维的受保护表面积。对于传统的大直径钢纤维,一旦其表面某处受到腐蚀性介质的攻击,整个纤维将受到影响。采用多根纤维时,即使其中部分纤维受到腐蚀,也不会波及到其它的纤维,从而提高了耐腐蚀能力。(3) 玻璃纤维位于芯部,远离碱性介质,可以得到很好的保护。(4) 采用了核-壳型模型。NHCR 服役过程中,一旦碳纤维率先破坏,所产生的冲击作用不会导致其他纤维的过早失效,应力损失小。同时碳纤维位于外部,可以保护玻璃纤维不受介质的浸蚀。(5) 与一般复合材料加强筋相比,钢纤维的延展性能仍然保留。

运用混合法则可以预测上述复合材料加强筋模型的断裂应力和应变关系。假设纤维与基体之间的界面结合良好,则此复合材料加强筋的轴向拉伸弹性模量可由下式计算得到:

$$E_H = E_s V_s + E_c V_c + E_t V_t + E_g V_g \tag{1}$$

式中:E_H 为混杂型复合材料加强筋的拉伸弹性模量;E_s、E_c、E_t、E_g 分别是钢纤维、碳纤维、芳纶纤维和玻璃纤维的弹性模量;V_s、V_c、V_t、V_g 分别是钢纤维、碳纤维、芳纶纤维和玻璃纤维的体积分数。这里不考虑基体树脂对复合材料弹性模量的贡献。假设其不承担载荷,则复合材料加强筋在不同失效阶段的应力可通过以下公式计算得到:

$$\sigma_{H_1} = E_H \varepsilon,\ 0 \le \varepsilon \le \varepsilon_y \tag{2}$$

$$\sigma_{H_2} = (E_c V_c + E_t V_t + E_g V_g)\varepsilon + \sigma_y V_s$$
$$\varepsilon_y \le \varepsilon \le \varepsilon_{c,max} \tag{3}$$

$$\sigma_{H_3} = (E_t V_t + E_g V_g)\varepsilon + \sigma_y V_s$$
$$\varepsilon_{c,max} \le \varepsilon \le \varepsilon_{t,max} \tag{4}$$

$$\sigma_{H_4} = E_g V_g \varepsilon + \sigma_y V_s,\ \varepsilon_{t,max} \le \varepsilon \le \varepsilon_{g,max} \tag{5}$$

$$\sigma_{H_5} = \sigma_y V_s,\ \varepsilon_{g,max} \le \varepsilon \le \varepsilon_{s,max} \tag{6}$$

式中:σ_{H_1}、σ_{H_2}、σ_{H_3}、σ_{H_4}、σ_{H_5} 为不同失效阶段复合材料加强筋的应力水平;σ_y 为钢纤维的屈服应力;ε_y、$\varepsilon_{c,max}$、$\varepsilon_{t,max}$、$\varepsilon_{g,max}$、$\varepsilon_{s,max}$ 分别为钢纤维的屈服应变以及碳纤维、芳纶纤维、玻璃纤维和钢纤维的断裂应变。在单轴载荷作用下,混杂型复合材料加强筋在应变为 0.2 %时开始发生屈服现象,表现为复合材料应力水平增加的幅度减慢。这是因为此时钢纤维开始屈服,不能承担更高的载荷。随着应变的增加,碳纤维、芳纶纤维和玻璃纤维继续承担载荷,表现为复合材料加强筋的应力水平继续增加。碳纤维首先失效,因为其断裂延伸率最小,然后依次是芳纶纤维、玻璃纤维和钢纤维,所以此类复合材料失效过程中将出现 4 次断裂,应力-应变曲线

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

上出现 4 次应力的突然下降，见图 2。为了获得延展性能，4 种纤维的体积分数需要进行优化设计，可通过下式计算得到：

$$\sigma_{H_2,max} \leq \sigma_{H_3,max} \leq \sigma_{H_4,max} \quad (7)$$

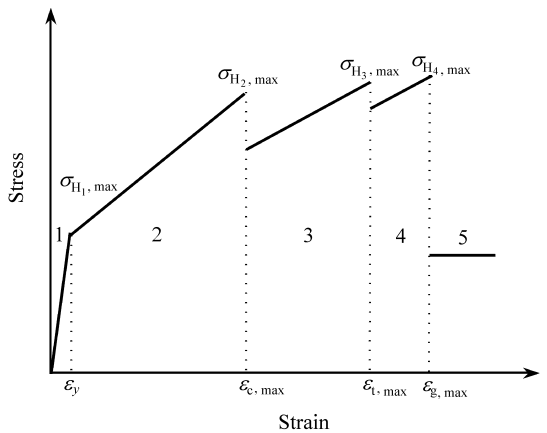

图 2 新型混杂型复合材料加强筋的理论应力-应变关系

Fig. 2 Theoretical stress-strain relationship of the new hybrid rebar

2 试样制备

所设计的新型复合材料加强筋试样直径为 10 mm，根据每种纤维的断面面积和体积分数可以计算出制造每根加强筋所需各种纤维相应的数量，见表 1。纤维长度为 450 mm。

首先用砂纸轻轻去除钢纤维表面的锈污，并用丙酮清洗。将玻璃纤维浸渍适量的环氧树脂后与钢纤维均匀、平行铺放在一起，然后将预先浸胶的芳纶纤维、碳纤维均匀包覆在其表面。采用双向拉伸的聚丙烯薄膜(BOPP，宽度 20 mm，厚度 30 μm)在上述复合纤维束的表面均匀缠绕，挤去多余的树脂，形成刚性复合材料棒状物，置于 120 ℃的加热炉中固化 6 h。待试样随炉冷却至室温后撕去表面的 BOPP 薄膜，切去两端，得到长 400 mm、直径 10 mm 的复合材料棒形加强筋。采用冷模压法制备了相同尺寸的玻璃纤维复合材料加强筋，纤维体积分数为 40 %。

3 实验方法

3.1 单轴拉伸实验

根据 ASTM D 3916[10]制作单轴拉伸试样。首先在试样两端制作锚固层(Anchor)。试验中选用碳纤维/芳纶纤维混杂平纹布和环氧树脂在两端制作长为 150 mm、厚度为 1 mm 的加厚层，然后再次经 120 ℃，6 h 固化。采用 MTS 810 系统进行单轴拉伸试验，加载速度为 5 mm/min，测试装置见图 3。采用电阻式应变片(FLA-5-11，Tokyo Sokki Kenkyujo 公司)和线性变化位移转换计(LVDT)两种方法来测量复合材料试样的拉伸应变。

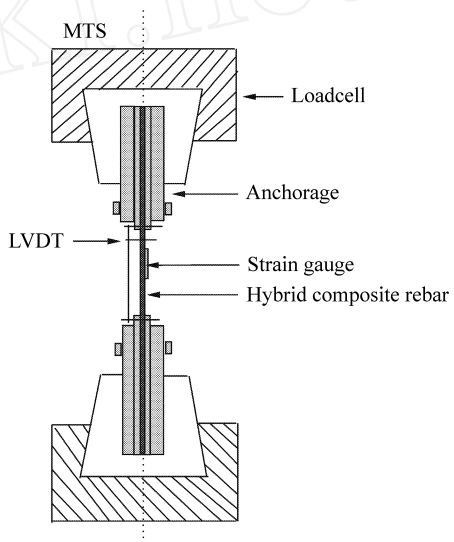

图 3 单轴拉伸测试装置

Fig. 3 Single axial tensile test device

3.2 加速老化实验

配制 0.6M KOH + 0.2M NaOH + 饱和

表 1 混杂型复合材料加强筋的材料组成

Table 1 Material combination of the new hybrid composite rebar

	Manufacturer	Specification	Elastic modulus/ GPa	Elongation at break/ %	Volume fraction/ %	Number
Carbon fiber	Zoltek	Panex 33, 48000	225	1.25	0.09	4
Twaron fiber	Twaron	sp-65, 2200 denier	102	2.05	0.07	23
Steel fiber	Local	Diameter 1 mm	200	20.0	0.40	40
Glass fiber	Taiwan electric	1100 tex	74	2.40	0.32	58
Epoxy resin	Taiwan reno	MRL-A5	3.5	6.00	0.12	--

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$Ca(OH)_2$ 混合溶液，测定其 pH 值为 12.8。该组成与新鲜混凝土中的各种离子种类与浓度相似。加速试验在 60 ℃下进行。选取 5 组混杂复合材料试样，每组 5 根。首先测定第一组每根试样的抗拉强度，取其平均值作为初始强度。将其余试样称重后置于上述碱性溶液中，分别于 2 周、4 周、6 周、8 周后取出，测定每根试样的重量和抗拉强度，计算每组试样的重量和强度变化，取其平均值。采用相同数量的玻璃纤维复合材料加强筋进行了对比试验。

4　结果与分析

4.1　单轴拉伸行为

对于复合材料棒状物的单轴拉伸测试标准很多，例如美国材料试验学会的 ASTM D3916、加拿大复合材料协会的 S 806-02 等。由于本试验中采用手工法制得的试样长度仅为 400 mm，只能根据 ASTM D3916 标准进行测试。测量复合材料棒状物的轴向应变可以采用电阻式应变片和线性变化位移转换计(LVDT)等方法，特别是前者的测量结果比较精确。然而本试验中的复合材料失效过程中是分步、逐渐破坏的，位于试样表面的碳纤维将首先断裂，从而引起电阻式应变片的破坏，所以电阻式应变片只能用于测量碳纤维破坏前的应变，可以精确测量并计算出复合材料加强筋的拉伸弹性模量。其后的应变需通过 LVDT 测量。

由图 4 中可以看出，这种新型混杂型复合材料加强筋表现出良好的延展行为。其弹性模量为 142.11 GPa(为钢筋的 71 %)，应力-应变关系的实验曲线与理论曲线基本一致。复合材料加强筋的强度为 627.58 MPa(为钢筋的 156 %)，比理论值略低。这是因为受成型工艺的影响，纤维之间没有完全平行排列，在外载作用下，处于弯曲状态的纤维要比处于平行状态的纤维具有更高的断裂应变，表现在拉伸过程中，实际上只有部分纤维承担外载，因此复合材料的整体强度和模量要比理论预测值偏低。即使是同种纤维的断裂也是逐渐进行的，这样在复合材料应力-应变关系曲线上很少出现应力水平突然下降的凸台，而是逐渐下降。因此复合材料具有很好的延展性，从而在服役过程中，能够提供预警信号。实验曲线与理论曲线存在差异的主要原因是芳纶纤维和玻璃纤维进行混杂复合后，特别是试样制备过程中，不能完全保证各种纤维在横截面上均匀分布。这样在拉伸过程中，当碳纤维断裂的同时，载荷迅速进行重新分布，产生了应力集中的现象，因此芳纶纤维和玻璃纤维的失效应变会小于理论应变，导致其过早断裂。

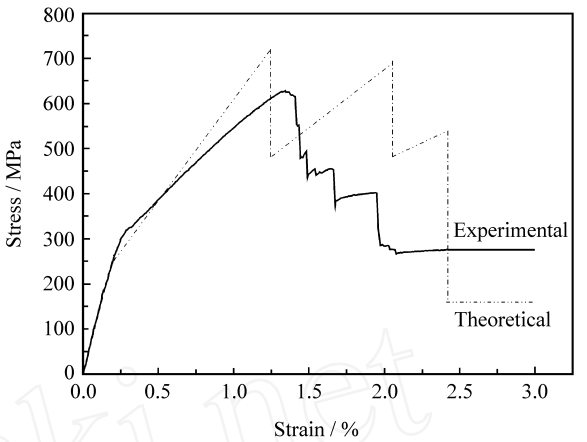

图 4　新型混杂型复合材料加强筋的应力与应变关系曲线

Fig. 4　Theoretical and experimental stress-strain curve of the new hybrid composite rebar

4.2　加速腐蚀性能

采用复合材料加强筋代替钢筋的主要目的是利用其良好的耐碱性能，混凝土系强碱性介质，pH 12.5～13.5。与钢筋相比，尽管复合材料的耐碱性能显著改善，然而对于玻璃纤维复合材料加强筋其耐碱性能仍然不理想，一般使用寿命只有 5～6 年[11]。

混杂型复合材料加强筋与玻璃纤维复合材料加强筋在 60 ℃的碱性介质(pH 12.8)中的重量变化情况见图 5(a)。根据 Litherlan 和 Oakley[12] 的实验结果，对于本试验中的加速腐蚀体系，其加速系数为 272。第 2 周、第 4 周、第 6 周、第 8 周的结果相当于 10 年、21 年、31 年、42 年后的结果。可以看出，混杂型复合材料加强筋的重量增加要明显低于玻璃纤维复合材料加强筋，特别是随着腐蚀时间的延长，这种差异更为明显。当浸渍 8 周后，混杂型复合材料加强筋的重量增加仅为玻璃纤维加强筋的 9.35 %，表明复合材料加强筋对于试验条件下的碱性介质十分稳定。

由图 5(b)中可以看出，在加速腐蚀过程中，混杂型复合材料加强筋的强度衰减速率要小于玻璃纤维加强筋，特别是随着时间的延长，混杂型复合材料加强筋的强度保持率非常高，第 8 周时的强度保持率高达 93.14 %，而同等条件下玻璃纤维加强筋的强度保持率仅为 73.62 %。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

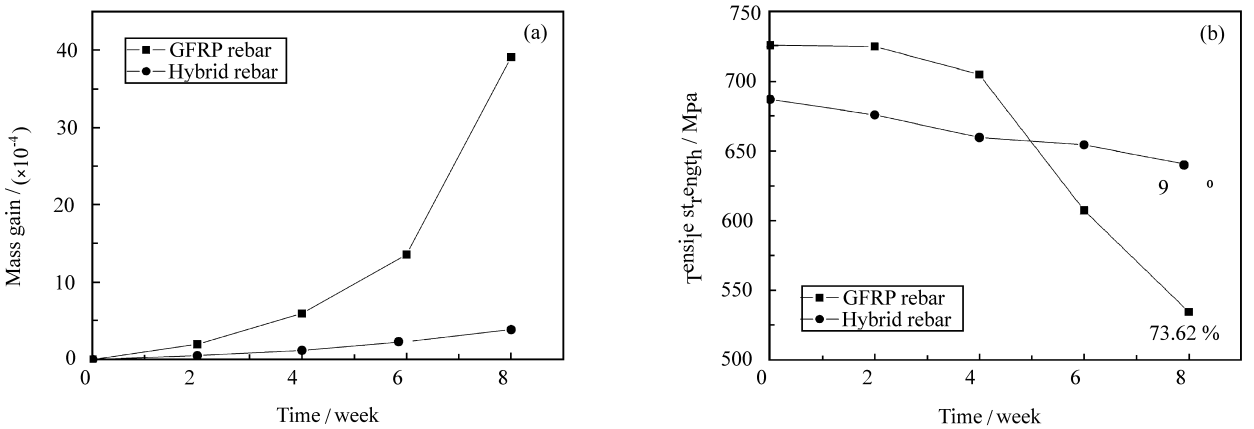

图 5　玻璃纤维与新型混杂型复合材料加强筋在腐蚀过程中的质量增量和拉伸强度变化

Fig. 5　Mass gain and variation in tensile strength of the new hybrid composite rebars and glass fiber composite rebars during corrosion experiment

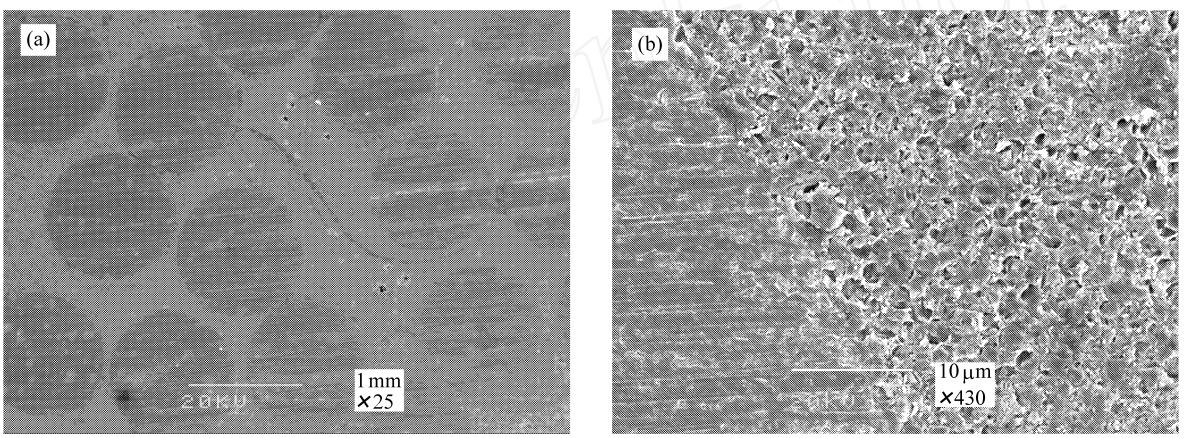

图 6　加速腐蚀 8 周后新型混杂型复合材料的微观组织

Fig. 6　Microstructures of the new hybrid rebar after 8 weeks of accelerating corrosion

图 6 是新型混杂型复合材料加强筋在经过 8 周的加速腐蚀后的横截面的微观组织照片。可以看出，钢纤维与其他纤维之间的界面基本完好无损，未观察到明显的腐蚀痕迹，这与力学性能的结果十分一致。

可见，新型混杂型复合材料加强筋由于这种特殊的结构设计，使得玻璃纤维和钢纤维得到很好的保护。这种混杂型复合材料在碱性介质中具有十分理想的耐腐蚀性能，即使在 40 年后，其各项性能也十分理想，可以用于混凝土结构的增强。

5　结　论

针对现有复合材料加强筋存在的模量低、无延展性和不耐腐蚀等缺点，建立了一种混杂型复合材料加强筋模型。试验结果表明其具有良好的延展行为，其抗拉弹性模量是钢筋的 71 %，抗拉强度是钢筋的 156 %；同时其耐腐蚀性能优于玻璃纤维复合材料加强筋。

参考文献：

[1]　Chaallal O, Benmokrane B. Fiber-reinforced plastic rebars for concrete applications [J]. *Composites: Part B*, 1996, 27B (2): 245 - 252.

[2]　Micelli F, Nanni A. Durability of FRP rods for concrete structures [J]. *Construction and Building Materials*, 2004, 18 (7): 491 - 503.

[3]　Phelan S R, Triantafillou T. Low cost maglev guideway design using hybrid FRP-reinforced concrete [A]. Proceeding of 1st Conference on High Speed Ground Transportation Systems [C]. New York: ASCE, 1992. 522 - 531.

[4]　Bakis C E, Nanni A, Terosky J A. Self-monitoring, pseudo-ductile, hybrid FRP reinforcement rods for concrete applica-

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

tions [J]. *Composite Science Technology*, 2001, 61(6): 815 - 823.

[5] Belarbi A, Watkins Steve E, Chandrashekhara K. Smart fiber-reinforced polymer rods featuring improved ductility and health monitoring capabilities [J]. *Smart Material Structure*, 2001, 10(3): 427 - 31.

[6] Bader M G, Manders P W. The strength of hybrid glass/carbon fiber composites ——Part 1: Failure strain enhancement and failure mode [J]. *Journal of Materials Science*, 1981, 16(12): 2233 - 2245.

[7] Kretsis G. A review of the tensile, compressive, flexural, and shear properties of hybrid fiber-reinforced plastics [J]. *Composites*, 1987, 18(1): 13 - 23.

[8] Qiu Y, Schwartz P. Micromechanical behavior of Kevlar-149/S-glass hybrid seven-fiber microcomposites Ⅰ: Tensile strength of the hybrid composite [J]. *Composites Science and Technology*, 1993, 47(2): 289 - 302.

[9] Bunsell A R, Harris B. Hybrid carbon and glass fiber composites [J]. *Composites*, 1974, 5(1): 157 - 164.

[10] Standard test method for tensile properties of pultruded glass-fiber-reinforced plastic rod [S]. American Society for Testing and Materials, ASTM D 3916. 1994.

[11] Liao K, Schlthseisz C R, Hunston D L. Long term durability of FRP-matrix composite materials for infrastructure applications: A review [J]. *Journal of Advanced Materials*, 1998, 30(4): 3 - 40.

[12] Litherlan K L, Oakley D R, Proctor B A. The use of accelerated aging procedures to predict the long term strength of GRF composites [J]. *Cement Concrete Research*, 1981, 11(3): 455 - 466.

(上接 35 页)

KEYWORDS FOR COMPOSITES

computational modelling
damage mechanics
finite element analysis (FEA)
laminate mechanics
micro-mechanics
numerical analysis
statistical properties/methods

D: TESTING

acoustic emission
chemical analysis
electron microscopy
fractography
mechanical testing
non-destructive testing
optical microscopy
physical methods of analysis
process monitoring
radiography
surface analysis
thermal analysis
ultrasonics

E: MANUFACTURING/PROCESSING

assembly
autoclave
automation
braiding
casting
chemical vapour deposition (CVD)
compression moulding
consolidation
cure
cutting
extrusion
fibre conversion processes
filament winding
forging
forming
heat treatment
injection moulding
isostatic processing
joints/joining
knitting
lay-up (manual/automated)
liquid metal infiltration
machining
melt-spinning
moulding compounds
powder processing
preform
prepreg
pultrusion
recycling
resin film infiltration (RFI)
resin flow
resin transfer moulding (RTM)
sintering
slip casting
stitching
surface treatments
tape
thermal analysis
thermoplastic resin
thermosetting resin
tooling
tow
weaving

(from *Composites Part A*)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net