

# GFRP 筋加强混凝土的粘结性能研究

晏石林<sup>1</sup>, 张炎<sup>1</sup>, 王伟<sup>1</sup>, 余波<sup>2</sup>

(1. 武汉理工大学理学院, 武汉 430070; 2. 黄石汇波防腐有限公司, 黄石 435002)

**摘要:** 采用拔出试验研究分析了玻璃纤维增强塑料(GFRP)筋和呋喃混凝土、普通水泥混凝土之间的粘结性能, 比较了对 GFRP 筋表面进行不同方法处理后的拔出强度, 并对 GFRP 筋加强呋喃混凝土梁进行了弯曲试验分析, 结果表明当对 GFRP 筋表面进行缠绕纤维等处理后它与混凝土之间的粘结强度将得到较大提高, 相对于普通混凝土来说 GFRP 筋与呋喃树脂混凝土之间具有更好的粘结性能, 并且在梁中使用 GFRP 筋代替普通钢筋可以使梁承受更高的破坏荷载和更好的防腐性能。

**关键词:** FRP 筋; 树脂混凝土; 粘结强度; 拔出试验

中图分类号: TU 528.572

文献标识码: A

文章编号: 1671-4431(2004)07-0034-04

## Bond Properties Investigation of GFRP Bars Reinforced Concrete

YAN Shi-lin<sup>1</sup>, ZHANG Yan<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>, YU Bo<sup>2</sup>

(1. School of Sciences, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Huangshi Huibo Corrosion Resistant Co Ltd, Huangshi 435002, China)

**Abstract:** This paper present a study on the behavior of furan resin concrete reinforced with GFRP bars and GFRP bars reinforcing concrete. The pull-out test and four-point flexural test were used to investigate the bond performance between GFRP bars and furan resin concrete. The bond strength of GFRP bars of different surface disposal was compared and also the GFRP bars reinforced furan resin concrete beam by flexural test was also studied. The conclusions indicated that the bond strength between concrete and GFRP bars which the surface is being wrapped up in fiber increased greatly and it also make the beams with higher load support capability and resistance to corrosion and therefore use GFRP bars to replace steel in beam.

**Key words:** FRP bars; resin concrete; bond strength; pullout test

在钢筋混凝土结构中, 钢筋的锈蚀对结构耐久性的影响十分严重, 它使许多工业和民用建筑过早失效, 或耗费巨大的维修费用。据铁道部 1997 年检查, 全路由于受不良介质严重腐蚀而受损的桥达 5 450 余孔, 其中 4 600 余孔承载力不足, 有相当一部分桥因钢筋锈蚀无法使用, 不得不更换新的钢筋混凝土梁, 造成巨大的经济损失, 且影响铁路的正常运行<sup>[1]</sup>。1984 年河海大学对浙江镇海的 22 座中小型淡水水工建筑物进行调查, 调查发现: 967 根构件中由于钢筋锈蚀导致出现顺筋裂缝破坏的有 538 根<sup>[2]</sup>。因此如何防止混凝土结构中的钢筋腐蚀问题具有非常重大的意义。

为了防止钢筋腐蚀, 目前世界上各个国家都根据具体的情况采取了相应的措施, 主要包括以下 3 种途径: 1) 严格保证混凝土的施工质量, 从各个方面加强混凝土的密实性, 以加强对钢筋的保护; 2) 通过阴极保护法、钢筋附加表面涂层和采用不锈钢等方法来加强钢筋的耐腐蚀能力; 3) 研制选用新材料<sup>[2]</sup>。虽然前 2 种途

收稿日期: 2004-03-08.

基金项目: 国家自然科学基金(19972049).

作者简介: 晏石林(1963-), 男, 教授. E-mail: yanshl@mail.whut.edu.cn

径可以减轻混凝土结构中钢筋的锈蚀问题,但是所花费用较高或工艺难度较大,而且锈蚀问题很难得到根本解决。因此,如果能够采用一种防腐性能优良、而且强度高、经济合理的新材料来代替钢筋,那就可以从根本上解决混凝土结构中加强筋的腐蚀问题。此外,在一些对防腐性能要求更高的场合,普通水泥混凝土已不能满足使用要求,若采用 FRP 加强树脂混凝土,则可以使之成为一种全防腐结构。

## 1 GFRP 筋的基本特点

常用的 FRP 筋有 3 种:玻璃纤维增强塑料(GFRP)筋、碳纤维增强塑料(CFRP)筋、阿拉米德纤维增强塑料(AFRP)筋<sup>[3]</sup>,它们都具有优良的抗腐蚀性和极高的抗拉强度,其中 GFRP 的弹性模量较低,但是价格便宜,便于推广应用,是研究的重点。

和普通钢筋相比,GFRP 筋抗腐蚀性能优越,能够在各种较强腐蚀性的环境中工作而不影响它的力学性能,它的抗拉强度为 600~1 100 MPa<sup>[4]</sup>。另外它还具有绝电磁性能、密度低(为钢筋的 1/4)、塑性变形小、抗疲劳性能好等特性。GFRP 筋的不足之处是:1)挤拉成型法生产的 GFRP 筋表面非常的光滑,不利于与混凝土粘结;2)GFRP 筋的弹性模量和剪切强度较低,导致变形较大且不易锚固。因此,如何解决 these 问题是 GFRP 筋实际应用中的关键。图 1 为 GFRP 筋与普通钢筋、冷拉钢丝的  $\sigma$ - $\epsilon$  曲线,可以看出在达到极限抗拉强度之前,GFRP 筋的应力应变基本呈线性关系,无塑性变形发生,这在混凝土结构中是非常有利的<sup>[5]</sup>。

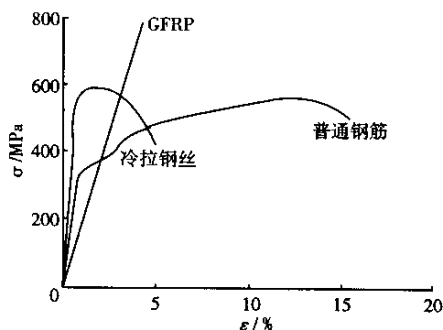


图 1 各种筋材的  $\sigma$ - $\epsilon$  曲线图

## 2 实验研究

### 2.1 拔出试验

树脂混凝土用的树脂主要有不饱和聚酯树脂、环氧树脂、乙烯基酯树脂和呋喃树脂等,其中呋喃树脂具有耐腐蚀性极强、价格低廉、粘结性能较差的特点,着重对 GFRP 筋加强呋喃树脂混凝土、GFRP 筋加强水泥混凝土进行研究。试验的目的是对不同表面处理的 GFRP 筋、普通钢筋和呋喃树脂混凝土、普通水泥混凝土之间的粘结强度进行测试。试件共分为 10 组,每组 3 个试件,试件尺寸都为 100 mm×100 mm×100 mm,筋材在混凝土中的埋入长度为 100 mm,各试件组的混凝土类型、加强筋及表面处理类型在表 1 中列出。

表 1 各组拔出试验的拔出荷载及平均粘结强度

试件组编号	混凝土类型	加强筋及表面处理	钢筋直径/mm	平均拔出荷载/kN	粘结强度/MPa
1	呋喃树脂型	表面缠绕纤维 GFRP 筋	8	18.8	7.48
2	呋喃树脂型	表面涂沙 GFRP 筋	8	10.8	4.30
3	呋喃树脂型	表面打毛 GFRP 筋	8	15.71	6.26
4	呋喃树脂型	光面钢筋	5	7.41	4.72
5	呋喃树脂型	螺纹钢	5	7.56	4.82
6	普通水泥型	表面缠绕纤维 GFRP 筋	8	17.8	7.09
7	普通水泥型	表面涂沙 GFRP 筋	8	16.43	6.54
8	普通水泥型	表面打毛 GFRP 筋	8	7.58	3.02
9	普通水泥型	光面钢筋	5	11.2	7.13
10	普通水泥型	螺纹钢	5	13 kN 时钢筋屈服	>8.28

试验在万能材料试验机上进行,试验夹具按照文献<sup>[6]</sup>特制加工,在试件的自由端固定好百分表以测量钢筋自由端的滑动位移。试验时记录荷载和自由端的滑动位移,当出现下面 3 种情况之一的时候即停止实验:1)加强筋自由端的滑动位移超过 0.1 mm;2)加强筋从混凝土中完全拔出;3)加强筋产生屈服断裂。

粘结强度按式(1)计算<sup>[6]</sup>

$$\sigma = (P_1 + P_2 + P_3) / 3\pi dl \quad (1)$$

式中,  $\sigma$  为加强筋与混凝土之间的粘结强度;  $P_1$  为加强筋自由端的滑动位移为 0.01 mm 的时候, 试件所受的荷载;  $P_2$  为加强筋的自由端的滑动位移为 0.05 mm 的时候, 试件所受的荷载;  $P_3$  为加强筋的自由端的滑动位移为 0.1 mm 的时候, 试件所受的荷载;  $d$  为加强筋的直径;  $l$  为加强筋的埋入长度。

## 2.2 GFRP 筋呖喃混凝土梁的弯曲试验

为了检测 GFRP 筋与树脂混凝土的粘结强度是否能够满足在梁构件中的要求, 分别对 GFRP 筋呖喃混凝土梁和钢筋呖喃混凝土梁进行了四点弯曲试验分析, 以观察是否可以在梁中用 GFRP 筋来取代钢筋以及它们之间的优缺点。每组 3 个试件, GFRP 筋直径 8 mm; 钢筋直径为 5 mm。GFRP 筋的表面处理采用试件组 1 的方式, 钢筋为光面钢筋。梁尺寸及玻璃钢筋的具体配置如图 2 所示。试验时采用逐级加载方式, 荷载每隔 30 min 增加一次, 每次为 50 kg, 记录每次加载后的荷载及位移数据, 观察出现裂纹的时间及裂纹的位置。

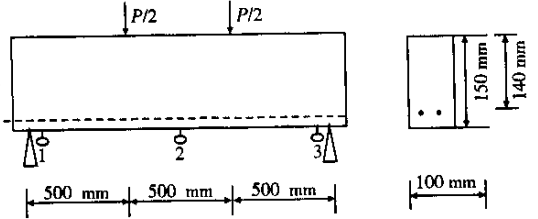


图 2 弯曲试验示意图

## 3 实验结果与分析

### 3.1 拔出实验结果与分析

每组拔出试验结果数据的平均粘结强度值列于表 1 中, 平均粘结强度示意图如图 3 所示。

由表 2 及图 3 可以看出各组试件的试验数据和各种加强筋和混凝土之间的粘结强度, 其中螺纹钢和普通混凝土之间的粘结强度为最大, 大于 8.28 MPa, 这是因为在螺纹钢自由端还没有发生滑动位移之前, 钢筋已经在荷载为 13 kN 时发生屈服失效了。对于表面经过不同处理的 GFRP 筋来说, 无论在呖喃树脂还是在普通混凝土中, 都是表面缠绕纤维玻璃钢筋的粘结性能最好, 分别达到 7.48 MPa 和 7.09 MPa。表面打毛玻璃钢筋与呖喃树脂混凝土的粘结强度(试件组 3)远大于打毛玻璃钢筋与普通混凝土的粘结强度(试件组 8), 这说明玻璃钢筋与呖喃树脂混凝土的粘结性能要优于玻璃钢筋与普通混凝土之间的粘结性能。而对于光面钢筋和螺纹钢来说, 它们与呖喃树脂的粘结强度要低于它们与普通混凝土的粘结强度, 这是因为钢筋和树脂混凝土的刚度相差较大, 界面的剪切应力集中大而造成平均粘结强度低。图中还可看出 GFRP 筋表面涂砂处理效果不好, 因此, 采用 GFRP 筋时不应采用此方法。

### 3.2 梁的弯曲实验结果与分析

对配置 2 根直径为 8 mm 的 GFRP 筋梁, 当梁出现第一条裂缝时, 相应的荷载为 9.07 kN, 跨中挠度为 6.86 mm, 裂纹的位置位于纯弯曲段右侧下部边缘, 随着荷载的继续增加裂纹沿着垂直横截面斜方向延伸, 当荷载继续增加 1 kN 后, 第一条裂纹的深度已扩展到约为梁深的 1/3, 当荷载增加 2 kN 后扩展到约为梁深的 2/3, 此时梁下表面裂纹最宽处约为 1 mm, 随着荷载的继续增加, GFRP 筋被拉断, 裂纹贯穿整个截面, 梁的极限断裂荷载平均值为 21.57 kN, 梁的荷载-挠度图见图 4。

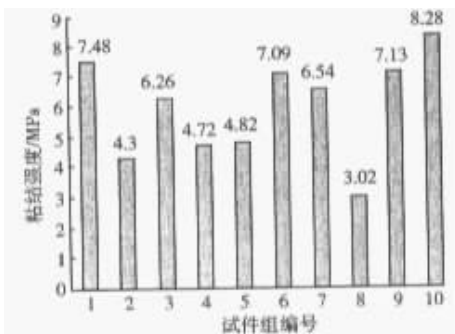


图 3 各组试件的粘结强度对比图

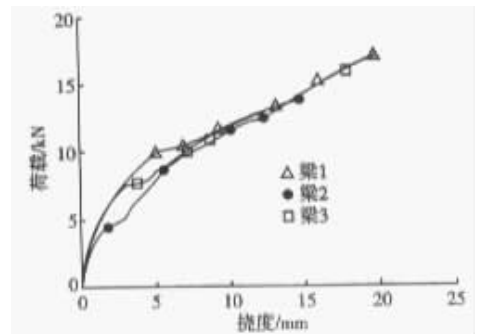


图 4 3 根 8 mm 玻璃钢筋梁荷载-挠度图

从 GFRP 筋呖喃混凝土梁的弯曲断裂面可以看出, GFRP 筋最后被拉断, 没有发生界面滑动脱胶现象, 即 GFRP 筋能够较好地与呖喃树脂混凝土粘结在一起, 能够满足构件共同承载的要求。比较 GFRP 筋梁和

钢筋梁,前者的破坏荷载为 21.57 kN,后者为 21.20 kN,即 GFRP 梁的破坏荷载比钢筋梁略大,这是由于 GFRP 筋的抗拉强度比钢筋高。但是 GFRP 筋梁在同样荷载作用下,比钢筋梁的挠度要大,尤其在开裂后梁的下半部分拉伸荷载全部由加强筋承担时,GFRP 梁的挠度约为钢筋梁的 3~4 倍。需要说明的是:GFRP 单位重量的价格是普通钢筋的 2 倍,但是单位体积的价格只有普通钢筋的 40%,因此采用 8 mm 直径的 GFRP 筋和 5 mm 直径的普通钢筋,其经济性相当。

## 4 结 论

a. 采用 GFRP 筋加强树脂混凝土和水泥混凝土时,筋的表面进行缠绕玻璃纤维处理,其效果比不处理或表面涂砂、表面打毛处理要好,可以获得较高的粘结强度。

b. GFRP 筋与呋喃树脂混凝土的粘结性能要明显优于与普通水泥混凝土之间的粘结性能。

c. 由于 GFRP 筋有较高的抗拉强度,因此 GFRP 筋梁能够承受较高的破坏荷载,但是变形较钢筋混凝土梁大。

d. 采用 GFRP 筋代替钢筋是完全可行的,不仅可以获得优良的防腐性能,而且在综合价格上与采用普通钢筋相当,尤其对于树脂混凝土结构,采用 GFRP 筋加强更加具有优越性。

## 参考文献

- [1] 袁国青. GFRP 筋增强混凝土梁受力性能分析[J]. 玻璃钢/复合材料,2001,(1):5~7.
- [2] 钱 锐,茅卫兵. 国外对混凝土结构中新型材料 FRP 筋的研究及应用[J]. 江苏建筑,2001,(1):28~33.
- [3] Brahim Benmokrane, Xu Haixue, Eric Bellavance. Bond Strength of Cement Grouted Glass Fibre Reinforced Plastic (GFRP) Anchor Bolts[J]. Rock Mech Min Sci & Geomech,1996,33(5):455~465.
- [4] Vickil Brown, Charles L Bartholomew. FRP Reinforcing Bars in Reinforced Concrete Members[J]. ACI Materials Journal,1993, 90(1):34~39.
- [5] Ye J Q, Wu Z J. Micro-mechanical Analysis of Splitting Failure in Concrete Reinforced with Fiber Reinforced Plastic Rods[J]. Cement & Concrete Composites, 2000,(22):243~251.
- [6] 纪午生,陈 伟,张应立,等. 常用建筑材料实验手册[M]. 北京:中国建筑材料工业出版社,1986. 296~297.
- [7] 戴绍斌,朱 健. 预应力碳纤维筋混凝土梁张拉损失的实验研究[J]. 武汉理工大学学报,2004,26(3):70~72.

# GFRP筋加强混凝土的粘结性能研究

作者: [晏石林](#), [张炎](#), [王伟](#), [余波](#)  
作者单位: [晏石林,张炎,王伟\(武汉理工大学理学院,武汉,430070\)](#), [余波\(黄石汇波防腐有限公司,黄石,435002\)](#)  
刊名: [武汉理工大学学报](#) ISTIC PKU  
英文刊名: [JOURNAL OF WUHAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY](#)  
年,卷(期): 2004,26(7)  
被引用次数: 3次

## 参考文献(7条)

1. [袁国青](#) GFRP筋增强混凝土梁受力性能分析[期刊论文]-[玻璃钢/复合材料](#) 2001(01)
2. [钱锐](#).[茅卫兵](#) 国外对混凝土结构中新型材料FRP筋的研究及应用[期刊论文]-[江苏建筑](#) 2001(01)
3. [Brahim Benmokrane](#).[Xu Haixue](#).[Eric Bellavance](#) [Bond Strength of Cement Grouted Glass Fibre Reinforced Plastic\(GFRP\) Anchor Bolts](#) 1996(05)
4. [Vickil Brown](#).[Charles L Bartholomew](#) [FRP Reinforcing Bars in Reinforced Concrete Members](#) 1993(01)
5. [Ye J Q](#).[Wu Z J](#) [Micro-mechanical Analysis of Splitting Failure in Concrete Reinforced with Fiber Reinforced Plastic Rods](#)[外文期刊] 2000(22)
6. [纪午生](#).[陈伟](#).[张应立](#) [常用建筑材料实验手册](#) 1986
7. [戴绍斌](#).[朱健](#) [预应力碳纤维筋混凝土梁张拉损失的实验研究](#)[期刊论文]-[武汉理工大学学报](#) 2004(03)

## 本文读者也读过(10条)

1. [张鹏](#).[薛伟辰](#).[李冰](#).[邓宇](#) [FRP筋粘结性能的试验研究及理论分析](#)[会议论文]-2006
2. [徐文锋](#).[孙泽阳](#).[吴刚](#).[吴智深](#).[蒋剑彪](#) [表面喷砂FRP筋与混凝土粘结性能试验研究](#)[会议论文]-2009
3. [吴景峰](#).[马顺龙](#) [新型环保自硬砂的研制及应用探索](#)[会议论文]-2008
4. [郭恒宁](#).[GUO Heng-ning](#) [复合材料筋混凝土的粘结滑移关系及锚固性能研究](#)[期刊论文]-[高科技纤维与应用](#) 2006,31(5)
5. [邢永平](#) [呋喃树脂自硬砂工艺及其在生产中的应用](#)[会议论文]-2007
6. [朱海堂](#).[谢晶晶](#).[高丹盈](#) [纤维增强塑料筋锚杆锚固性能的数值分析](#)[期刊论文]-[郑州大学学报\(工学版\)](#) 2004,25(1)
7. [殷晓莉](#).[YIN Xiao-li](#) [高原干燥气候对呋喃树脂自硬砂性能的影响](#)[期刊论文]-[热加工工艺](#)2000(5)
8. [郭恒宁](#).[张继文](#) [FRP筋混凝土的粘结性能及影响因素](#)[会议论文]-2006
9. [郭振廷](#) [呋喃树脂自硬砂使用中几个问题的探讨](#)[期刊论文]-[造型材料](#)2003,27(2)
10. [江学良](#).[杨慧](#).[毛妙](#).[孟茁超](#).[彭朝晖](#).[JIANG Xue-liang](#).[YANG Hui](#).[MAO Miao](#).[MENG Zhuo-chao](#).[PENG Zhao-hui](#) [玻璃纤维增强塑料\(GFRP\)锚杆粘结性能的影响因素分析](#)[期刊论文]-[湖南城市学院学报\(自然科学版\)](#) 2011,20(1)

## 引证文献(3条)

1. [晏石林](#).[余启明](#) [FRP筋呋喃树脂混凝土梁蠕变性能试验研究](#)[期刊论文]-[武汉理工大学学报](#) 2006(9)
2. [张钧林](#).[周搏](#) [螺旋扭增强材料表面特征对锚固性能的影响](#)[期刊论文]-[武汉理工大学学报](#) 2006(9)
3. [张娟霞](#) [混凝土结构破坏机理的数值试验研究](#)[学位论文]博士 2006