

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.S2.004

# FRP-钢复合筋的生产制备及其拉伸性能研究进展

潘俊

(深圳大学 广东省滨海土木工程耐久性重点实验室, 广东 深圳 518000)

**摘要:** 本文根据国内外关于 FRP-钢复合筋的生产制备以及试验研究, 介绍了 FRP-钢复合筋的结构设计、生产加工工艺及其拉伸力学性能研究现状, 为 FRP-钢复合筋今后的研究提供一定的参考。

**关键词:** FRP-钢复合筋; 生产制备; 拉伸性能

**中图分类号:** TU528.01    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-4764(2016)S2-0018-03

## Research progress on fabrication technique and tensile performance of FRP-Steel composite Bar

Pan Jun

(Guangdong Provincial Key Laboratory of Durability for Marine Civil Engineering,  
Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, P. R. China)

**Abstract:** According to the fabrication technique and experimental research about FRP-Steel Composite Bar around the world, this paper introduces the studying and present status about structure design, Fabrication Technique and Tensile Performance of FRP-Steel Composite Bar, The results form an important basis for further study of FRP-Steel Composite Bar.

**Key words:** FRP-Steel Composite Bar; Fabrication Technique; Tensile Performance

钢筋作为一种加强材料被广泛应用于混凝土结构中,然而当暴露于不利环境(碳化、氯离子侵蚀、海洋环境等)时,混凝土中的钢筋容易发生锈蚀,从而影响结构的使用寿命。为了应对钢筋的锈蚀问题,一种新型建筑材料——纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Plastics)加工而成的筋材——FRP 筋成为了钢筋的替代品。然而 FRP 是线弹性材料,没有类似钢筋的屈服和延性;同时 FRP 材料价格昂贵,这些特点限制了其在工程中的实际应用。综合分析钢材和 FRP 材料的性能特点后,国内外的研究者们提出将 FRP 材料和钢材复合,以期得到综合性能优异的 FRP-钢复合筋材。

但是,将 FRP 材料和钢材复合形成的 FRP-钢复合筋材,由于结构形式材料构成与普通钢筋和

FRP 筋迥异,其复合可能出现正效应、负效应、正-副混合效应。并非能够达到研究者们期待的理想效果。为此,有必要对 FRP-钢复合筋的加工工艺和结构设计进行探讨。

### 1 FRP-钢复合筋生产制备及拉伸性能文献综述

为了充分发挥 FRP 材料的耐腐蚀性能,并有效保护复合筋中的钢材,通常以普通钢筋、钢绞线或者细钢丝作为复合筋的内芯,在外面包裹碳纤维或者玻璃纤维形成复合筋筋材。

文献[1-2]提出了 FRP 包覆筋的概念,即以钢等高延性的金属材料为芯材,FRP 材料为包覆层,形成的 FRP 包覆筋。表面的纤维可以是围绕芯材

收稿日期:2016-12-02

基金项目:深圳市基础科研项目(JCYJ20150828155800601,0)

作者简介:潘俊(1991-),男,硕士生,主要从事 FRP-钢复合筋研究,(E-mail)pan108339@126.com。

双向编织或者缠绕也可以经纬正交铺设(经度方向沿复合筋轴向,维度沿复合筋环向)。研究者试验加工了一种方案:即以环氧树脂为粘结材料,在光圆钢筋表面沿轴向正负  $45^\circ$  缠绕玻璃纤维,经过加热炉加热固化,从而得到 FRP 包覆筋,成型示意图如图 1 所示。以光圆钢筋为芯材,设计加工了 5 种不同缠绕层数(往返一个来回为一层)的复合筋,并进行了拉伸力学试验。试验结果表明,FRP 包覆筋的应力-应变本构呈现出明显的双线性特性,具有屈服和延性破坏的特征。

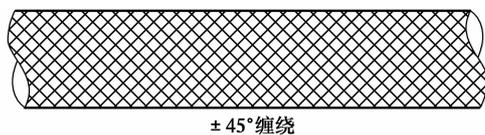


图 1 FRP 包覆筋的成型原理示意图

文献[3]综合考虑钢绞线和 FRP 各自的性能特点,提出以钢绞线或者细钢丝束等金属材料为芯材,在外部包裹 FRP 材料,得到一种新型纤维增强塑料(FRP)-钢绞线复合筋。文献[4]提出了一种新型玻璃纤维增强(GFRP)-光纤光栅(FBG)智能复合筋。研究者参考了 FRP 筋拉挤成型工艺,提出了 GFRP-FBG 智能复合筋的加工工艺,以玻璃纤维、钢绞线、光纤传感元件和环氧树脂为原材料,进行了智能复合筋的制备。内嵌钢绞线 GFRP 智能复合筋的制作工艺流程图如图 2 所示。加工过程中通过改良的分纱板使钢绞线和光纤传感元件均匀分布于复合筋中心,分纱板如图 3 所示。内嵌钢丝 GFRP 智能复合筋的截面示意图如图 4 所示。研究者分别制作了内嵌 2 根、3 根和 4 根钢丝的 GFRP 智能筋,并进行了拉伸力学性能试验,测定了其弹性模量。发现新型智能复合筋的弹性模量与普通 GFRP 相比略有增大(3%~8%),随着钢丝使用数量增长而增长。

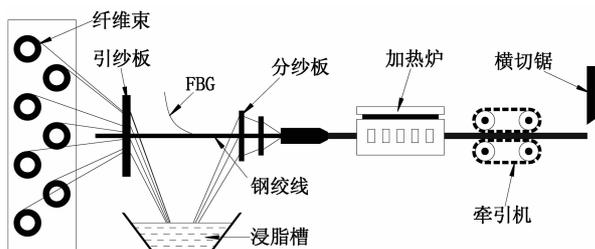


图 2 内嵌钢丝 GFRP 智能复合筋制作工艺流程图

文献[5-6]提出了一种以普通钢筋为芯材,在外部包裹连续纤维(碳纤维、玄武岩纤维)形成的钢-连续纤维复合筋(Steel Fiber Composite Bar—FSCB)。

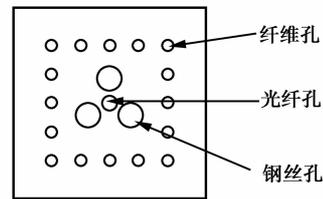


图 3 分纱板

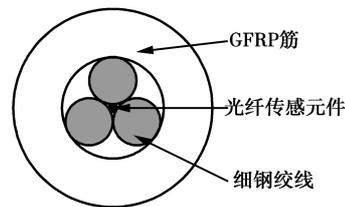


图 4 内嵌钢丝 GFRP 智能复合筋截面示意图

研究者选用碳纤维布和玄武岩纤维布形式的纤维材料,分别以工程中常用的螺纹钢筋和光圆钢筋为复合筋的芯材,进行了复合筋的手工制备;具体介绍了手工制备钢-连续纤维复合筋的复合方法、界面处理方式、外表面处理方式等。研究者利用手工制作的钢-连续纤维复合筋进行了拉伸试验,试验结果表明:使用光圆钢筋作为复合筋的芯材时,所制作的复合筋在拉伸过程中均以纤维布和光圆钢筋之间的分离破坏而告终,复合筋无法充分发挥材料的强度;使用螺纹钢筋作为芯材时,纤维布和螺纹钢筋之间的界面良好,复合筋拉伸试验过程中,钢筋首先屈服,随后纤维破碎,材料强度发挥较好。文献还提出了工业化制备钢-连续纤维复合筋的方法,包括工艺流程,钢筋预处理等。文献[7-8]对工业化制备的钢-连续纤维复合筋进行了单向拉伸试验和反复拉伸试验。单向拉伸试验结果表明:钢-连续纤维复合筋的应力-应变本构具有明显的双折线特性,在复合筋内部的钢筋屈服以前,内部的钢筋和外部的纤维共同受力,曲线接近直线;钢筋屈服以后,新增加的荷载主要由复合筋外部的纤维层承担,筋材具有稳定的二次刚度;复合筋的屈服前刚度、屈服荷载、屈服后刚度、极限荷载等性能指标的试验值与根据材料复合法则推导出来的理论值吻合较好,材料强度得到充分发挥。反复加载试验表明:在反复加载过程中,钢-连续纤维复合筋具有较小的残余变形和良好的可恢复性,反复加载过程对复合筋的强度和刚度产生的削弱较小。研究者还基于统计分析建立了 FSCB 的应力-应变恢复力模型,模型预测效果

良好。

文献[9]提出了一种“FRP 混杂筋”。研究者参考了拉挤成型工艺和编织工艺,提出了一种改进的拉挤成型工艺“braidtrusion”,如图 5 所示。这种改进的工艺在加工过程中给外部的纤维提供了一个预应力,能够有效减少复合筋加工过程中筋材内部产生的孔隙,从而提高筋材的性能;通过在筋材表面包裹尼龙纤维,形成凸起的肋状物,以提高筋材与混凝土协同工作的性能。研究者 GFRP 材料和普通钢筋,试验生产了三种不同类型的 GFRP 混杂筋:(a) GFRP 外壳,内芯为光圆钢筋;(b) GFRP 外壳,内芯为分散的细钢丝;(c) GFRP 外壳,内芯为带肋钢筋;筋材的截面示意图如图 6。笔者用实验手段研究了加工的 FRP 混杂筋的力学性能。试验结果显示 3 种不同界面的 FRP 混杂筋均表现出双折线的应力-应变本构关系,FRP 混杂筋的弹性模量受混杂筋横截面钢/纤维比和筋材截面种类显著影响。

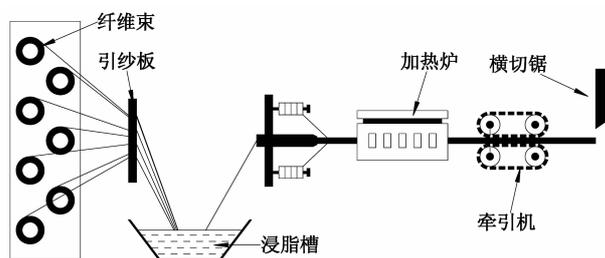


图 5 FRP 混杂筋生产工艺流程图

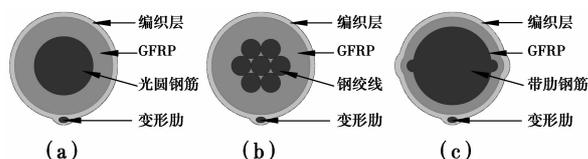


图 6 FRP 混杂筋截面类型

## 2 FRP-钢复合筋微结构设计

由 FRP 材料和钢材复合而成的 FRP-钢复合筋不同于单一材料构成的普通钢和纯 FRP 筋,筋材性能具有一定的可设计性。作为混凝土结构中的加强材料,复合筋最主要的性能是筋材的力学性能及其与混凝土的粘结性能。

1) 力学性能:复合筋的力学性能主要取决于复合筋加工过程中所使用的 FRP 材料和钢材的材料性能,以及两种材料在复合筋中所占的体积之比。通过调整复合筋中两种材料体积比,可以在一定范围内改变复合筋的拉伸力学性能。

2) 复合筋与混凝土的粘结性能:通过改变筋材表面的处理方式,如喷砂,表面螺纹处理等可以显著改善复合筋与混凝土之间的粘结性能。

## 3 展望

作为一种新的建筑材料,FRP-钢复合筋本身的材料构成远比普通钢筋和纯 FRP 筋复杂,筋材的性能不仅取决于 FRP 材料、钢材以及两者的体积比,同时也取决于筋材生产过程中的加工质量。目前为止,对于 FRP-钢复合筋的研究还仅处于探索性阶段。还需要更多的研究者来展开相关的研究工作。相信随着筋材加工工艺的改善以及复合筋相关性能研究工作的深入,FRP-钢复合筋在实际工程中的应用将十分广泛。

### 参考文献:

- [1] 郑百林,李伟,张伟伟,等. 增强混凝土中 FRP 包覆筋研究(I):微结构设计[J]. 复合材料学报,2004,21(1): 33-37.
- [2] 郑百林,李伟,张伟伟,等. 增强混凝土中 FRP 包覆筋研究(II):力学性能测试[J]. 复合材料学报,2004,21(3):79-83.
- [3] 欧进萍,张志春,周智,等. 纤维增强塑料钢绞线复合筋:中国,2006100099366[P]. 2007-01-17.
- [4] 兰春光,周智,欧进萍. 内嵌钢丝 GFRP-FBG 智能复合筋的研制及其性能分析[J]. 沈阳建筑大学学报,2012,28(1):72-78.
- [5] 罗云标,吴刚,吴智深. 钢-连续纤维复合筋(FSCB)的生产制备研究[J]. 工程抗震与加固改造,2009,31(1): 28-34.
- [6] 罗云标,吴刚,吴智深. 钢-连续纤维复合筋(FSCB)力学性能试验方法研究[J]. 工业建筑,2006:106-109.
- [7] 吴刚,罗云标,吴智深. 钢-连续纤维复合筋(FSCB)单向拉伸力学性能试验研究[J]. 工程抗震与加固改造,2009,31(1):1-6.
- [8] 吴刚,罗云标,吴智深. 钢-连续纤维复合筋(FSCB)力学性能试验研究与理论分析[J]. 土木工程学报,2010,43(3):53-61.
- [9] DONG W S, KI T P, YOUNG J Y, et al. Experimental investigation for tensile performance of GFRP-steel hybridized rebar[J]. Advances in Materials Science and Engineering,2016.