

玄武岩纤维复合材料在土木工程领域中的应用研究现状

孙航 彭晓丽*

陆军工程大学爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室

摘要: 玄武岩纤维增强复合材料 (Basalt Fiber Reinforced Polymer, BFRP) 与其他纤维材料相比具有易于生产加工、经济环保等特点, 已在岛礁工程及近海工程等复杂严峻的工程环境中得到广泛的应用。通过整理玄武岩纤维复合材料的国内外相关现状, 本文总结了玄武岩纤维复合材料在土木工程领域中主要有玄武岩纤维混凝土、BFRP加固混凝土结构以及BFRP筋混凝土梁等几个方面的应用, 研究发现玄武岩纤维及其制品性能良好稳定, 能够有效地提高混凝土结构的力学性能, 适合在土木工程领域大力推广。

关键词: 玄武岩; 纤维复合材料; 土木工程领域; 应用研究

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.13.019

引言

钢筋混凝土结构的耐久性问题愈加显著, 而钢筋锈蚀是成为影响混凝土结构耐久性的首要的因素之一。钢筋锈蚀会导致钢筋强度下降、钢筋与混凝土之间的黏结强度降低、混凝土胀裂等一系列问题, 严重威胁混凝土构件的服役安全和使用寿命, 并带来巨大的经济损失^[1, 2]。根据中国科学院海洋研究所2014年的调研结果, 我国腐蚀总成本高达 2.1×10^4 亿元, 占2014年国民经济总产值的3.34%, 按照比例, 2020年我国腐蚀成本约为

3.4×10^4 亿元^[3]。

近年来, 随着纤维增强复合材料 (Fiber Reinforced Polymer, FRP) 的发展, FRP筋由于其抗拉强度大、耐腐蚀等优良性能被视为是解决钢筋锈蚀问题的理想材料。玄武岩纤维增强复合材料 (Basalt Fiber Reinforced Polymer, BFRP), 以天然玄武岩矿石作为生产原料, 加工生产过程中不产生有害气体与工业废物, 生产能耗相对较低, 属于新型绿色材料^[4], 大力发展BFRP材料对实现我国“碳中和”、“碳达峰”以及构建资源节约型社会的战略目标具有重大意义。并且与其他纤维材料相比, BFRP材料具有性价比高、线胀系数与混凝土较为接近、自重小、绝缘性等优良性能, 在岛礁工程及近海工程等复杂严峻的工程环境中得到广泛应用^[5]。

一、国内外研究现状

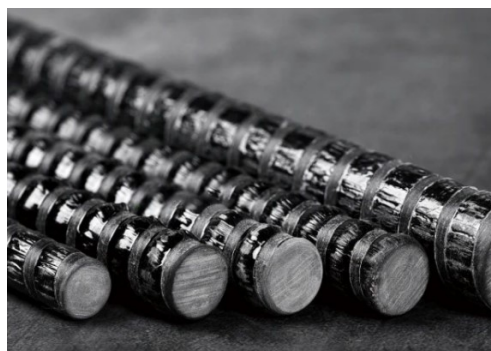
玄武岩纤维的生产研发最早追溯到20世纪60年代, 由前苏联最先开始。而我国直至20世纪90年代末, 才正式对玄武岩连续纤维展开深入研究工作, 本世纪初期我国加大了对玄武岩纤维以及系列制品研发工作的投入。经过多年努力, 目前我国玄武岩纤维的生产和制成工艺方面均居国际先进水平, BFRP材料被广泛应用于土木工程领域^[6]: ①利用BFRP纤维改善混凝土的强度和韧性; ②将BFRP材料制成网格、片材、布等贴到混凝土构件表



a. BFRP-短切纤维



b. BFRP锚杆



c. BFRP筋



d. BFRP布

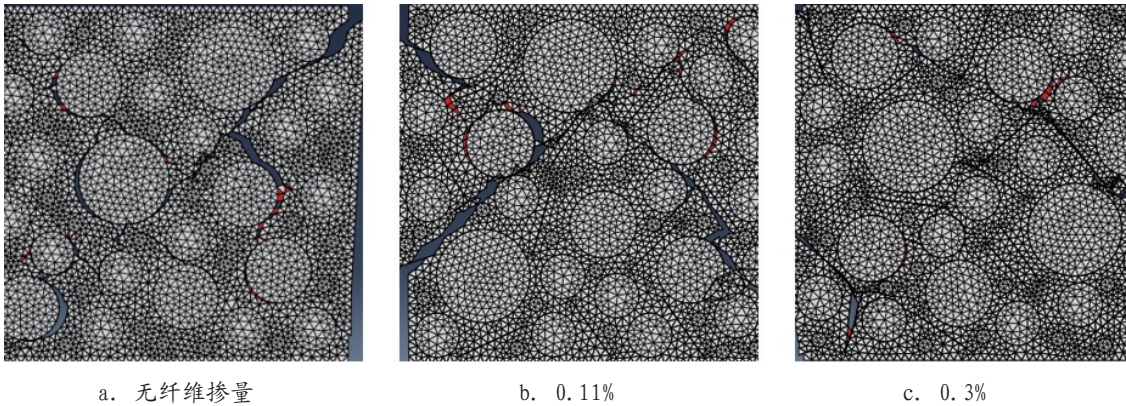


图1-3 不同玄武岩纤维掺量BFRC的裂纹发展情况

面进行补强、修复和加固；③BFRP材料制作成BFRP筋代替传统钢筋。图1-3为江苏绿材谷公司生产的玄武岩纤维系列制品。

(一) 玄武岩纤维混凝土研究现状

在混凝土中掺入玄武岩纤维形成玄武岩纤维混凝土 (Basalt Fiber Reinforced Concrete, BFRC)，是改善传统混凝土韧性差、易开裂等缺点的切实可行的办法。Wang^[7]研究发现，纤维的体积分数与长度是影响BFRC力学性能的关键因素，在一定的体积分数范围内 (0.10%~0.15%)，相比于普通混凝土，BFRC的断裂模量和抗压强度显著提高。为了深入研究其理论机理，贺正波^[8]采用数值分析的方法模拟了BFRC细观模型的受压破坏过程，分析BFRC内部裂缝发展过程以及破坏模式，

发现玄武岩纤维能够有效地阻止裂纹的发展，改变裂纹形成的路径，揭示了玄武岩纤维改善混凝土抗拉强度以及韧性的机理，如图1-3所示。

(二) BFRP表面加固混凝土构件

由于BFRP材料的轻质高强以价格便宜等优点，目前研究表明在混凝土构件表面粘贴BFRP片材或BFRP布对其进行加固可以有效提高混凝土梁的抗弯承载力以及改善其延性^[9, 10]。He^[11]采用BFRP格栅以及聚合物水泥砂浆组成的复合加固层对钢筋混凝土梁进行加固，如图1-4所示，试验研究表明，加固后的试验梁，其抗弯刚度以及承载力得到显著提高。张灼见^[12]同样采用BFRP格栅-水泥砂浆的加固体系对混凝土梁进行加固，试验梁的极限荷载最大增加了37.09%。



图1-4 BFRP格栅加固混凝土梁

(三) BFRP筋的力学性能及耐久性

虽然BFRP筋有许多优良的力学性能，深入研究其基本力学性能对推广BFRP筋的应用以及研发性能更加优良的产品具有深远意义。为探究BFRP筋的基本力学性能，顾兴宇^[13]进行了一系列的拉伸试验，研究表明BFRP筋为线弹性材料，破坏时呈脆性破坏特征，其弹性模量 E_f 为40GPa左右，约为钢筋的23%，分析认为玄武岩纤维的含量是决定BFRP筋弹性模量的关键因素，可以通过增加玄武岩纤维含量的办法增大BFRP筋的弹性模量。

脂基质黏结界面的破坏是BFRP筋力学性能退化的主要原因。

尽管BFRP筋的耐腐蚀性更好，但并不能抵抗所有的恶劣环境所导致的力学性能退化，探究BFRP筋在环境因素的影响下力学性能的变化规律，能够有效预测BFRP筋混凝土构件的服役年限，避免因BFRP筋的力学性能退化而发生危险。周俊龙^[14]对比了盐溶液与碱溶液对BFRP筋的腐蚀程度，如图1-5所示，研究表明，BFRP筋在碱性环境中力学性能退化更严重。吴刚^[15]通过扫描电子显微镜观察碱性环境腐蚀后BFRP筋的断面发现，纤维与树

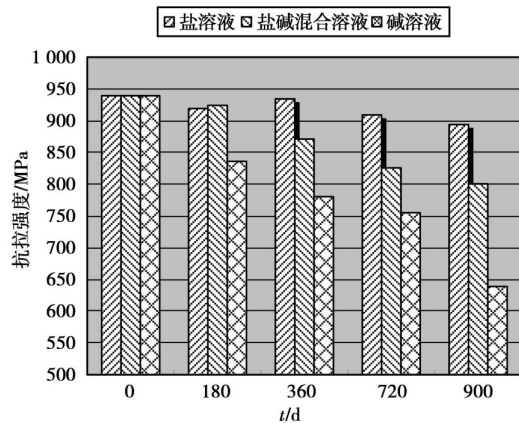


图1-5 不同溶液中BFRP筋力学性能退化情况

BFRP筋具有轻质、高强、耐腐蚀等相似的力学性能，其弹性模量低（约为钢筋的20%~65%）、应力应变关系呈线弹性和没有屈服阶段等特点^[16]，BFRP筋及其他具有相似力学性质的FRP筋与混凝土结合形成梁构件的抗弯性能，与钢筋混凝土梁迥然不同。

Fareed Elgabbas^[17]等人对6根BFRP筋混凝土梁进行了四点弯曲试验，分析了BFRP筋直径和配筋率对梁开裂荷载、挠度及破坏模式的影响，研究发现开裂荷载受混凝土强度影响较大，而开裂后，低配筋率会导致挠度和应变迅速增加。Smitha Gopinath^[18]等人首先进行了BFRP筋抗拔试验，得到BFRP筋黏结强度、沟槽尺寸及BFRP筋直径对黏结性能的影响，在此基础上进一步研究了BFRP筋混凝土梁的抗弯承载力，提出了BFRP-NSM (Near Surface Mounted Strengthening) 方法，可以将梁的承载力提高1倍。Lapko^[19]等人对BFRP筋混凝土筒支梁的承载力进行了试验和理论研究，分析了梁的挠度、混凝土应变、裂缝宽度和临界荷载，发现与普通钢筋相比，BFRP筋可以有效提高梁的延性，减小裂缝宽度，是普通钢筋的理想代替材料。

二、结论

通过整理玄武岩纤维复合材料的国内外相关现状，本文总结了玄武岩纤维复合材料在土木工程领域中主要有玄武岩纤维混凝土、BFRP加固混凝土结构BFRP筋混凝土结构等几个方面的应用。本文的主要结论如下：

1. 目前我国玄武岩纤维的生产和制成工艺方面均居国际先进水平，大力发展BFRP材料对实现我国“碳中和”、“碳达峰”以及构建资源节约型社会的战略目标具有重大意义。

2. 在混凝土中掺入玄武岩纤维形成玄武岩纤维混凝土，是改善传统混凝土韧性差、易开裂等缺点的切实可行的办法。

3. 目前研究表明在混凝土构件表面粘贴BFRP片材或BFRP布对其进行加固可以有效提高混凝土梁的抗弯承载力以及改善其延性

4. 过调整BFRP筋表面形状参数，可以显著提高BFRP筋与混凝土之间的黏结强度，并且BFRP筋混凝土梁与传统的钢筋混凝土梁相比，在承受弯曲荷载时，跨中位移更大，裂缝跨度更大需要进一步开发更加合理准确的抗弯承载力预测公式。

参考文献

[1] 赵羽习. 钢筋锈蚀引起混凝土结构锈裂综述[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43(05): 1122-1134.

[2] 董志强, 吴刚. FRP筋增强混凝土结构耐久性性能研究进展[J]. 土木工程学报, 2019, 52(10): 1-19+29.

[3] 侯保荣, 路东柱. 我国腐蚀成本及其防控策略[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(06): 601-609.

[4] GB 50608-2020, 纤维增强复合材料工程应用技术标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2020.

[5] 丁宝明, 张蕾, 刘嘉麒. 中国玄武岩纤维材料产

业的发展态势[J]. 中国矿业, 2019, 28(10): 1-5.

[6] 吴智深, 汪昕, 史健喆. 玄武岩纤维复合材料性能提升及其新型结构[J]. 工程力学, 2020, 37(05): 1-14.

[7] Wang X H, HE Jun, Mosallam A S, et al. The Effects of Fiber Length and Volume on Material Properties and Crack Resistance of Basalt Fiber Reinforced Concrete (BFRC) [J]. Advmatersci eng, 2019(4): 1-17

[8] 贺正波, 王辉明, 郑凌潇. 基于黏结裂缝模型的玄武岩纤维混凝土单轴受压破坏分析[J]. 混凝土世界, 2021(08): 70-73.

[9] Sim J, Park C, Moon D Y. Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures[J]. Composites Part B, 2005, 36(6/7): 504-512.

[10] 吴刚, 蒋剑彪, 宗晟. 玄武岩纤维布加固混凝土梁试验研究[J]. 特种结构, 2007, 24(6): 43-47.

[11] Weidong He, Xin Wang, Zhishen Wu. Flexural behavior of RC beams strengthened with prestressed and non-prestressed BFRP grids[J]. Composite Structures, 2020, 246.

[12] 张灼见. BFRP格栅与PCM加固钢筋混凝土梁的抗弯性能研究[D]. 广东工业大学, 2021.

[13] 顾兴宇, 沈新, 陆家颖. 玄武岩纤维筋压伸力学性能试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2010, 45(06): 914-919.

[14] 周俊龙, 江世永, 李炳宏, 等. 玄武岩纤维增强塑料筋耐腐蚀性研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(S1): 218-222.

[15] 吴刚, 朱莹, 董志强, 等. 碱性环境中BFRP筋耐腐蚀性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(08): 32-41.

[16] 徐新生, 郑永峰. FRP筋力学性能试验研究及混杂效应分析[J]. 建筑材料学报, 2007(06): 705-710.

[17] Fareed Elgabbas, Patrick Vincent, Ehab A. Ahmed, Brahim Benmokrane. Experimental testing of basalt-fiber-reinforced polymer bars in concrete beams[J]. Composites Part B, 2016, 91: 205-218.

[18] Smitha Gopinath, Ramachandra Murthy A, Husain Patrawala. Near surface mounted strengthening of RC beams using basalt fiber reinforced polymer bars[J]. Construction and Building Materials, 2016, 111: 1-8.

[19] Lapko A, Urbański M. Experimental and theoretical analysis of deflections of concrete beams reinforced with basalt rebar[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2015, 15: 223-230.

通讯作者: 彭晓丽