

玄武岩纤维增强锚杆在边坡工程中的研究现状及展望

邓新雨, 孙洪军

辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

收稿日期: 2025年5月6日; 录用日期: 2025年6月14日; 发布日期: 2025年6月24日

摘 要

随着工业的崛起, 纤维增强聚合物(Fiber Reinforced Polymer, FRP)在土木工程中也得到了较好的发展和应用。玄武岩纤维增强聚合物(Basalt Fiber Reinforced Polymer, BFRP)锚杆作为一种新型绿色复合材料支护结构, 因其轻质高强、耐腐蚀、抗疲劳等特性, 在岩土工程中展现出替代传统钢锚杆的潜力。本文基于目前BFRP锚杆的研究成果, 阐述了BFRP的材料性能、锚固性能以及工程实践研究现状, 说明了在边坡支护工程应用中使用BFRP锚杆取代传统钢筋锚杆的可行性与先进性, 并对BFRP锚杆研究领域存在的不足进行了分析, 本文可为BFRP锚杆的工程推广提供参考。

关键词

BFRP锚杆, 力学性能, 锚固性能, 界面破坏

Research Status and Prospect of Basalt Fiber Reinforced Anchor Rods in Slope Engineering

Xinyu Deng, Hongjun Sun

School of Civil Engineering and Architecture, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

Received: May 6th, 2025; accepted: Jun. 14th, 2025; published: Jun. 24th, 2025

Abstract

With the rise of industry, Fiber Reinforced Polymer (FRP) has seen significant development and application in civil engineering. Basalt Fiber Reinforced Polymer (BFRP) anchors, as a novel green

composite material support structure, demonstrate considerable potential to replace traditional steel anchors in geotechnical engineering due to their lightweight, high strength, corrosion resistance, and fatigue resistance properties. This paper discusses the current research findings on BFRP anchors by elaborating on the material properties of BFRP, its anchoring performance, and the status of practical engineering studies. It highlights the feasibility and advantages of using BFRP anchors instead of conventional steel rebar anchors in slope support projects. Furthermore, this paper analyzes existing shortcomings within the field of BFRP anchor research and aims to provide valuable insights for promoting the engineering application of BFRP anchors.

Keywords

BFRP Anchor Bolt, Mechanical Properties, Anchoring Performance, Interface Destruction

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在锚固工程中, 锚杆由于是主动支护, 且能有效提高岩土体的稳定性, 控制岩土体的位移和变形, 特别是在软弱地层和松散土层中, 效果更为显著, 与其他支护形式相比锚杆支护通常具有较低的成本, 且施工速度快, 可以节省大量的经济资源, 在边坡工程及地下工程中得到广泛的应用[1]。传统的锚杆技术虽然在一定程度上解决了边坡稳定性的问题, 但其材料的耐久性、抗腐蚀性以及施工难度等方面仍存在诸多不足。随着材料学的兴起, 在工程领域也相应引入复合纤维增强塑料(FRP)材料[2]。根据纤维的不同, FRP 可分为玻璃纤维增强塑料(Glass fiber reinforced plastic, GFRP) [3]、碳纤维增强塑料(Carbon fiber reinforced plastic, CFRP) [4]、芳纶纤维增强塑料(Aramid fiber-reinforced plastic, AFRP) [5]以及玄武岩纤维增强塑料(Basalt fiber-reinforced plastic, BFRP) [6]。BFRP 材料因其轻质、高强度、耐腐蚀等优良特性, 逐渐成为岩土锚固领域的研究热点。相较于钢筋锚杆, BFRP 锚杆的弹性模量较低, 这使其在岩土体发生一定变形时能够提供更好的适应性, 同时吸收更多的能量, 从而避免出现刚性锚杆可能导致的脆性破坏。早期, BFRP 被用于加固钢筋混凝土梁[7], 以及用于海洋环境下代替普通钢筋用于结构工程[8], 随着理论的不深入, BFRP 逐渐开始被用于边坡工程及地下工程。本文基于对 BFRP 锚杆已有的研究成果进行总结归纳, 期望为 BFRP 锚杆在锚固工程领域的发展及推广提供参考。

2. BFRP 锚杆材料性能研究现状

2.1. BFRP 锚杆力学性能

力学性能是衡量材料用于工程优劣的重要指标。为了研究 BFRP 用于土木工程领域的可行性, 国内外已有众多学者对 BFRP 棒材的力学性能进行了大量的试验研究。系统的分析了 BFRP 筋材的拉伸性能、剪切性能和破坏模式。杜志刚[9]等通过试验分析 BFRP 筋的线弹性特征及拉伸破坏模式, 其抗拉强度平均值是 HRB400 钢筋的 1.5 倍, 并且发现 BFRP 筋的破坏模式为脆性破坏, BFRP 筋材是典型的线弹性体。陈尚建等[10]对 BFRP 棒材进行了抗拉强度试验, 发现其力学性能已完全满足工程应用要求。Fan [11]、赵文等[12]通过对不同直径的 BFRP 筋材进行拉伸测试, 也得出类似结论。BFRP 筋及 HRB400 钢筋主要规格和性能指标如表 1 所示。BFRP 筋和螺纹钢筋的应力 - 应变曲线如图 1 所示。

Table 1. Main specifications and performance indicators of BFRP bars and HRB400 bars
表 1. BFRP 筋和 HRB400 钢筋主要规格和性能指标

性能	规格(mm)	BFRP 筋	HRB400 钢筋
拉伸强度/MPa	12	851	极限强度标准值 400
	16	1000	
	20	900	
拉伸弹性模量/GPa	12	45	200
	16	48	
	20	45	
极限应变/%	12	1.90	平均伸长率为 14
	16	2.08	
	20	2.08	
密度/(kg · m ⁻³)	12	1956.8	7800
	16	2050.0	
	20	2020.0	

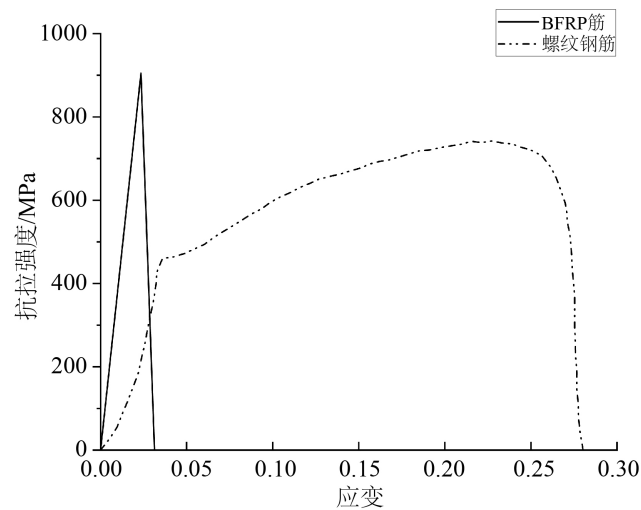


Figure 1. Comparison diagram of stress-strain between BFRP bars and ordinary bars

图 1. BFRP 筋与普通钢筋应力 - 应变对比图

相较于普通钢筋锚杆，BFRP 锚杆的抗拉性能要更优越，但是其抗剪性能和弹性模量要低于普通钢筋锚杆，这就造成 BFRP 锚杆控制岩土体的变形能力要弱于普通钢筋锚杆。高先建等[13]通过剪切试验发现 BFRP 锚杆平均剪切强度要比普通钢筋锚杆低 10%左右，王路兰[14]通过试验也验证了该结论。张书博等[15]通过室内直剪试验研究对比了 BFRP 筋与传统钢筋锚固节理岩体抗剪性能发现 BFRP 筋与钢筋在剪切过程中同样表现出韧性，且抗剪强度受锚固倾角的影响较大。Xie 等[16]通过节理岩体双剪试验，研究发现较大的锚固倾角或预应力可以提高 BFRP 锚杆的抗剪性能。虽然 BFRP 的抗剪性能不如钢筋锚杆，但是可通过调整锚杆倾角来增强锚杆的整体强度。在后续研究中，如何提高 BFRP 锚杆的抗剪性能以及提高控制岩土体变形能力是一个重要课题。

2.2. BFRP 锚杆耐腐蚀性能

在边坡支护工程中, 由于岩土体中含有水分。边坡支护结构的抗腐蚀性能直接关系到工程的安全性和稳定性。如果支护结构因腐蚀而损坏, 可能导致边坡滑坡、崩塌等危险情况, 所以对于支护结构的抗腐蚀性能要求尤为重要[17]。普通钢筋锚杆一般通过涂抹防腐涂料以达到防腐效果, 但随着时间的推移防腐涂层难免会脱落, 很难达到防腐效果。吴刚等[18]对浸泡在 60℃碱溶液的 BFRP 筋进行拉伸试验, 发现经过 45 天后 BFRP 筋的抗拉强度保留率仍有 70.4%。杨国梁[19]将 BFRP 筋置于酸溶液中, 经 38 天浸泡测试抗拉强度发现平均保留率仍有 92.6%。一般来说, 玄武岩纤维在酸性环境下的耐受性优于碱性环境。对于水泥基锚固剂, BFRP 锚杆的耐腐蚀性能要优于普通钢筋锚杆。俞晨晖[20]通过数值模拟比较了 BFRP 锚杆和钢锚杆在腐蚀环境下抗拉力的变化, 研究发现 BFRP 锚杆的安全稳定性远远高于钢锚杆, 可替换钢锚杆做永久支护构件。

3. BFRP 锚杆锚固性能

3.1. 黏结性能

FRP 锚杆主要由三部分组成, 包括: 锚杆、锚具、锚固体[21]。FRP 筋之间的粘结力由化学粘结、机械咬合、摩擦力机制构成[22]。当锚杆体受力时, 化学胶着力是粘结力的主要部分, 当岩土体施加给锚杆体的力持续增加时, 随着化学胶着力的破坏, 杆体与粘结剂之间的机械咬合力、摩擦力是粘结的主要部分。BFRP 锚杆的锚固性能核心体现在其与周围介质的黏结强度和荷载传递机制。高丹盈等[23]建立了 FRP 锚杆与岩石体的粘结 - 滑移理论方程, 并对锚固性能进行了有限元数值分析和现场试验, 几种典型的 FRP 筋粘结滑移关系如图 2 所示[24]。国内外学者通过大量试验验证 BFRP 筋的荷载 - 滑移基本上可以分为微滑段、滑移段、剥离段和下降段这四个阶段。

对已有文献中 BFRP 锚杆试验及模拟总结发现: BFRP 锚杆破坏与钢筋锚杆破坏有很多相似之处, 主要破坏模式有: 锚杆杆体材料破坏、第一界面破坏(锚杆与锚固体界面)、第二界面破坏(锚固体与岩土体界面)、岩土体破坏[25], 如图 3 所示。冯君等[26][27]通过室内拉拔试验与现场试验发现 BFRP 锚杆均为第二界面破坏, 第一界面在受到拉拔时并未达到极限状态, 且第二界面强度已经发生滑移破坏, 罗金标等[28]也有类似的结论。这是由于灌浆料与锚杆的粘结性能较好, 而由于岩土体的力学性能较弱造成的。

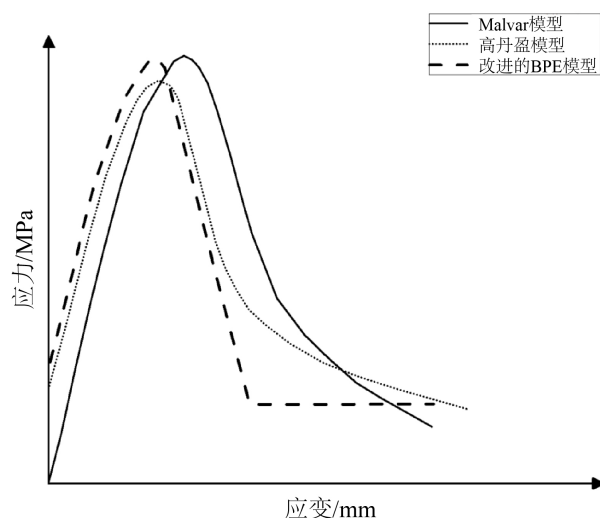


Figure 2. Comparison of different FRP bar bonding and sliding models

图 2. 不同 FRP 筋粘结滑移模型对比

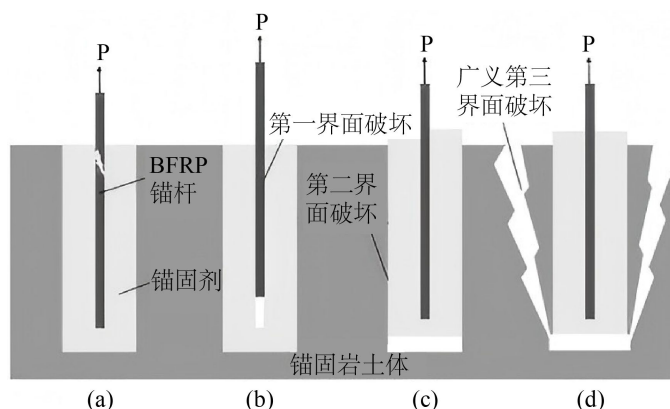


Figure 3. Failure modes of the BFRP anchor bolt anchoring system

图 3. BFRP 锚杆锚固系统的破坏形式

3.2. 影响锚固性能的因素

影响 BFRP 锚杆与灌浆体的粘结效果有很多因素, 如 BFRP 筋的粗糙度、螺纹深度、灌浆体的含沙量以及灌浆体的强度等[29]。高先建等[30]通过粘结试验发现, 水泥基灌浆料强度越高, 锚杆与灌浆体的粘结强度越高。沈新等[31]对不同螺纹深度的 BFRP 筋进行拉拔试验, 发现无螺纹的 BFRP 筋拉拔性能要低于带螺纹的 BFRP 筋。冯君等[29]通过调整灌浆体的含沙量, 发现灌浆体中的含砂越高, 锚固体系的粘结性越好。这是因为灌浆料中的砂可以有效增加锚杆与灌浆体的机械摩擦力, 从而增大第一界面锚固力。通过学者们的试验可以知道, 虽然 BFRP 锚杆通常为第二界面破坏, 但提高第一界面的锚固力同样重要, 当灌浆料与锚杆粘结力不足时会发生突然的拔出破坏。当应用于工程现场时, 此时破坏造成的损失巨大。

目前针对 BFRP 第二界面破坏理论研究还不够充分, 学者们大部分是通过确定性因素影响来研究第二界面破坏。较大的锚杆直径可以提供较大的极限拉拔性能, 抵抗剪切破坏的能力也会越强。随着锚固长度的增加, BFRP 锚杆的极限荷载也会随之增加, 但增大幅度会越来越小。陶亚文等[32]通过 BFRP 砂浆锚杆拉拔试验, 研究了 BFRP 砂浆锚杆的锚固粘结性能, 发现锚固长度、筋材直径对锚杆粘结强度造成显著影响, 但随着锚固长度的增加, 锚杆与锚固体的粘结强度却降低, 这说明 BFRP 锚杆与钢筋锚杆类似, 也存在“临界锚固长度”。冯君等[26]通过室内加载试验也得到同样的结论, 当锚固长度大于临界长度时, 锚杆的极限承载力将不再增加。王路兰[14]通过 FLAC^{3D} 模拟 BFRP 锚杆支护边坡不同的锚杆入射倾角, 发现当入射倾角为 45°时锚杆的支护效果最好。目前 BFRP 锚杆的支护设计参数未有相应的系统规范, 参数仍参考钢筋锚杆的相应规范。

4. BFRP 锚杆在边坡工程中的研究进展

在边坡支护中, 锚杆支护作为主动支护形式, 由于其施工简单、对岩土体的扰动小得到了广泛应用。由于土压力依靠锚杆提供的拉力承担, 且土体存在滑动面, 所以对锚杆的抗拉以及抗剪强度有较高的要求。高先建[30]通过对某项目场地内开挖的基坑边坡进行 BFRP 锚杆支护并结合 FLAC^{3D} 模拟, 验证了非预应力 BFRP 锚杆加固土质边坡的设计方法是合理的可行的。高岩川[33]等通过现场试验对比钢筋锚杆与 BFRP 锚杆, 发现玄武岩筋材锚杆在锚杆最大拉力、边坡变形都要小于钢筋锚杆, 验证了玄武岩纤维筋材替换现有普通钢筋锚杆是可行的。Feng [34]和 Wang [35], 通过试验研究表明, BFRP 锚杆用于边坡锚固具有轴力衰减率低的特点, 也得到了上述相似的结论。郭成鹏等[36]对玄武岩纤维杆体材料和灌浆料进行力学性能测试, 在此基础上, 依据 FLAC^{3D} 对玄武岩纤维锚杆与灌浆料粘结性能进行数值模拟分析,

结果表明 BFRP 具有耐腐蚀、轻质、高强等优良特性, 比钢筋或钢绞线更适合作为锚杆材料应用于岩土工程锚固。多项研究验证了 BFRP 锚杆的轻质、高强、耐腐蚀等特性, 其抗拉强度与钢筋锚杆相当甚至更优, 且能显著降低锈蚀风险, 延长工程寿命。刘毅[37]利用路堑边坡进行支护试验将 BFRP 锚杆与钢筋锚杆做对比, 发现采用直径 14 mm 的 BFRP 筋材支护路堑边坡, 其效果与采用直径为 32 mm 的钢筋锚杆支护边坡相当, BFRP 锚杆支护比普通钢筋锚杆支护要节约 10% 的成本, 且 BFRP 锚杆不会存在锈蚀问题。结合其长期寿命和维护成本低的特点, 全生命周期成本要比普通钢筋锚杆要更低, 其非金属的特性也更符合绿色工程的发展趋势。Wu 等[38]研究发现 BFRP 锚杆作为一种支撑边坡的柔性结构, 与钢锚相比, 可以有效降低地震波对边坡的影响, 并在一定程度上衰减地震波。此外, BFRP 锚杆可以与边坡协调变形, 提高边坡的整体工作性能, 特别是限制中下边坡的动力响应。

现有的研究成果多为在短期实验或数值模拟, 对于 BFRP 锚杆在复杂支护条件(如冻融循环、土壤酸碱环境下的侵蚀)下的长期耐久性验证。建议在以后的研究中可以着重于 BFRP 锚杆在复杂环境(腐蚀、冻融、干湿循环)下的力学性能退化规律, 及其与土体-锚固界面-灌浆料的耦合作用机理的研究。

5. 结论与展望

目前学者针对 BFRP 锚材料性能、锚杆力学性能以及实际工程应用都验证了 BFRP 锚杆在边坡工程中的可行性且效果较好。相较于普通钢筋锚杆, BFRP 锚杆有以下优势:

(1) 力学性能优越: 玄武岩纤维增强锚杆具有较高的抗拉强度、抗剪强度和耐腐蚀性能, 能够有效提高边坡的稳定性。实验结果表明, 玄武岩纤维增强锚杆的抗拉强度比传统钢锚杆高出 20% 以上, 且在长期使用中表现出优异的耐久性。

(2) 环境友好: 玄武岩纤维是一种天然材料, 生产过程中产生的环境污染较小, 符合绿色建筑和可持续发展的要求。此外, 玄武岩纤维增强锚杆在废弃后可以回收再利用, 减少了对环境的负担。

尽管玄武岩纤维增强锚杆在边坡工程中展现出诸多优势, 鉴于 BFRP 锚杆的未来发展趋势, 还需对其进行以下研究与探索:

(1) 由于 BFRP 锚杆抗剪强度要低于钢筋锚杆, 提高其抗剪性能是一个重要课题。进一步优化玄武岩纤维的制备工艺, 研究不同纤维长度、直径和排列方式对锚杆性能的影响, 开发出更加高性能的玄武岩纤维增强锚杆。

(2) 现有研究多集中于短期力学性能, 缺乏长期服役周期的蠕变、疲劳及多场耦合(冻融 - 化腐蚀 - 荷载)退化规律数据研究, 应进一步探讨多种因素作用下 BFRP 锚杆的力学行为及锚固性能。

(3) 由于 BFRP 锚杆存在第一和第二界面破坏, 应该在提高第一界面粘结性能和构建第二界面粘结滑移模型再继续探索。

(4) 进一步完善 BFRP 锚杆相关国家和地方标准的制定, 推动行业的进步, 使得 BFRP 制品在生产过程中规范化, 试验操作标准化, 试验方法科学。

参考文献

- [1] 白晓宇, 王海刚, 张明义, 等. 抗浮锚杆承载性能研究进展[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(8): 2949-2958.
- [2] Attia, M.M., Ahmed, O., Kobes, O. and Malek, A.S. (2022) Behavior of FRP Rods under Uniaxial Tensile Strength with Multiple Materials as an Alternative to Steel Rebar. *Case Studies in Construction Materials*, **17**, e01241. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01241>
- [3] Wang, X., Deng, C., Qin, Y., Shen, G. and Chen, C. (2021) Study on Shear Stress Distribution of Glass Fiber Reinforced Polymer Soil Nail in Foundation Pit Support Pullout Test. *Journal of Physics: Conference Series*, **2009**, Article 012024. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2009/1/012024>
- [4] McKay, K.S. and Erki, M.A. (1993) Grouted Anchorages for Aramid Fibre Reinforced Plastic Prestressing Tendons.

- Canadian Journal of Civil Engineering*, **20**, 1065-1069. <https://doi.org/10.1139/I93-137>
- [5] Lucena, J.R.P.G., Carabbacan, A.P.I., Manggapis, F.F., Kumar, S.D. and Cruz, O.G.D. (2024) Strength, Serviceability, and Anchorage of Fiber-Reinforced Polymer and Carbon Fiber Composite Prestressing Tendons. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **1326**, Article 012047. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1326/1/012047>
 - [6] 吴凤, 刘彤, 廖万鹏, 等. 玄武岩纤维增强树脂复合材料的现状与发展[J]. 塑料, 2023, 52(2): 89-93.
 - [7] 欧阳煜, 王鹏, 李翔. 玄武岩纤维布加固钢筋混凝土梁受弯试验研究[J]. 建筑结构, 2008, 38(11): 74-77+84.
 - [8] 郭范波, 徐岳, 金辉, 等. 海洋环境下玄武岩纤维布增强混凝土桥墩的耐久性试验研究[J]. 桥梁建设, 2014, 44(1): 75-80.
 - [9] 杜志刚, 陶亚文, 高富强, 等. 玄武岩纤维筋的力学特性与破坏模式试验研究[J]. 矿产勘查, 2023, 14(2): 304-309.
 - [10] 陈尚建, 欧阳普英, 苏先科, 等. 玄武岩纤维增强复合材料(BFRP)力学性能的试验研究[J]. 建筑结构, 2007, 37(S1): 414-416.
 - [11] Fan, X., Xu, T., Zhou, Z. and Zhou, X. (2017) Experimental Study on Basic Mechanical Properties of BFRP Bars. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **250**, Article 012014. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/250/1/012014>
 - [12] 赵文, 王浩, 陈云, 等. BFRP 筋锚杆土质边坡支护应用研究[J]. 工程地质学报, 2016, 24(5): 1008-1015.
 - [13] 高先建, 谢强, 赵文, 等. 非预应力 BFRP 锚杆加固土质边坡设计参数确定试验研究[J]. 公路交通科技, 2017, 34(7): 20-28+36.
 - [14] 王路兰. 玄武岩纤维增强复合锚杆在公路边坡加固中的模拟分析研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2023.
 - [15] 张书博, 王长盛, 王刚, 等. BFRP 筋锚固节理岩体剪切行为试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(4): 712-724.
 - [16] Xie, J., Wang, X., Ding, L., Peng, Z., Liu, X., Mao, W., et al. (2024) Shear Behavior of BFRP Anchor-Jointed Rock Mass Considering Inclination Angle and Pre-Tension. *Construction and Building Materials*, **447**, Article 138157. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138157>
 - [17] 李帅乾, 郭忠平, 温卓越, 等. 酸性环境下渗锌锚杆腐蚀特征及力学性能劣化研究[J]. 矿业研究与开发, 2025, 45(3): 164-176.
 - [18] 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(8): 32-41.
 - [19] 杨国梁. 玄武岩纤维复合筋材力学性能试验及岩土锚固应用[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2016.
 - [20] 俞晨晖. 玄武岩纤维锚杆替换钢锚杆用于边坡支护的有限元分析[J]. 甘肃水利水电技术, 2018, 54(2): 38-40.
 - [21] 刘浪. 预应力 BFRP 锚杆设计与锚固性能研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2021.
 - [22] 孔令艳, 刘树昌, 鲍玖文, 等. FRP 筋与海水海砂混凝土界面粘结性能研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(1): 147-157.
 - [23] 高丹盈, 张钢琴. 纤维增强塑料锚杆锚固性能的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(20): 126-131.
 - [24] 王梓航, 缪禹辰, 赖正聪, 等. BFRP 锚杆在岩土锚固中的研究现状与展望[J]. 建筑技术, 2024, 55(15): 1812-1815.
 - [25] 白晓宇, 井德胜, 王海刚, 等. 玄武岩纤维增强聚合物锚杆用于边坡支护工程之研究现状[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(31): 12702-12710.
 - [26] 冯君, 赖冰, 张圣亮, 等. 玄武岩纤维增强锚杆加固混合土室内拉拔试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(6): 1193-1200.
 - [27] 冯君, 王洋, 张俞峰, 等. 玄武岩纤维与钢筋锚杆锚固性能现场对比试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(11): 4185-4193.
 - [28] 罗金标, 彭哲琦, 汪昕, 等. 新型玄武岩纤维复合材料(BFRP)锚杆力学性能研究[J]. 复合材料科学与工程, 2022(12): 79-86.
 - [29] 冯君, 王洋, 吴红刚, 等. 玄武岩纤维复合材料土层锚杆抗拔性能现场试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(7): 2563-2573.
 - [30] 高先建. 玄武岩纤维增强复合锚杆支护土质边坡设计方法的试验研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2017.
 - [31] 沈新, 顾兴宇, 陆佳颖. 玄武岩纤维(BFRP)筋与混凝土粘结性能试验研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2010, 8(3): 124-130.
 - [32] 陶亚文, 杜志刚, 丁梧秀, 等. BFRP 砂浆锚杆锚固黏结性能试验研究[J]. 混凝土, 2022(4): 170-175.

- [33] 高岩川, 贺雄, 胡熠. 玄武岩纤维复合筋材在岩土工程中的应用研究[J]. 四川建筑, 2016, 36(5): 85-87.
- [34] Feng, J., Wang, R., Zhang, Y., Tu, Z. and Yang, T. (2023) Examining the Creep Characteristics of Basalt Fiber-reinforced Polymer Grouted Bolts in Mixed Soil. *International Journal of Geomechanics*, **23**, Article 04023164. <https://doi.org/10.1061/jgnai.gmeng-8355>
- [35] Wang, H., Bai, X., Zhang, M., *et al.* (2020) Research Progress of Basalt Fiber Reinforced Polymer Anchors in Rock and Soil Anchoring. *Composite Materials: Science and Engineering*, **8**, 113-122.
- [36] 郭成鹏, 林学军, 李涛, 等. 玄武岩纤维筋用作锚杆的适宜性研究[J]. 洛阳理工学院学报(自然科学版), 2012, 22(4): 24-27.
- [37] 刘毅. 路堑边坡玄武岩纤维筋锚杆支护的应用[J]. 科技创新与应用, 2019, 9(21): 163-166.
- [38] Wu, H., Wu, Z., Lei, H. and Lai, T. (2021) Application of BRFP New-Type Anchor Cable Material in High Slopes against Earthquakes. *Advances in Civil Engineering*, **2021**, Article 6689718. <https://doi.org/10.1155/2021/6689718>