

CFRP拉索锚固技术研究综述

陈柏宏, 鲁鹏, 罗德康, 孙权伟, 汤凯菱

重庆科技学院, 建筑工程学院, 重庆

收稿日期: 2022年10月16日; 录用日期: 2022年11月17日; 发布日期: 2022年11月24日

摘要

碳纤维复合材料(CFRP)以良好的抗拉性能、耐疲劳性能和耐腐蚀性能等成为了目前土木工程材料研究领域不可缺少的部分, 在大跨空间结构中得到了广泛的运用, 但是CFRP的端部锚固一直是难以解决的问题。自20世纪40年代, 随着对CFRP锚固技术不断的探索, 目前在该领域内取得了进步, 因此本文从CFRP自身的材料特性, 锚固形式以及多种工况下分析了众多学者对CFRP锚固技术方面的实验和结论, 整理了CFRP锚固的机理与方法, 为CFRP锚固技术的研究提供参考。

关键词

碳纤维复合材料(CFRP), 大跨空间结构, CFRP锚固技术

Review of CFRP Cable Anchorage Technology

Baihong Chen, Peng Lu, Dekang Luo, Quanwei Sun, Kailing Tang

College of Architectural Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: Oct. 16th, 2022; accepted: Nov. 17th, 2022; published: Nov. 24th, 2022

Abstract

Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) has become an indispensable part in the field of civil engineering materials research due to its good tensile properties, fatigue resistance and corrosion resistance, and has been widely used in large-span space structures. However, the end anchorage of CFRP has always been a difficult problem to solve. Since the 1940s, with the continuous exploration of CFRP anchorage technology, progress has been made in this field. Therefore, this paper analyzes the experiments and conclusions of many scholars on CFRP anchorage technology from the material characteristics of CFRP itself, anchorage forms and various working conditions, straightens out the mechanism and methods of CFRP anchorage, and provides a reference for the research of CFRP anchorage technology.

Keywords

Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP), Long Span Spatial Structure, CFRP Anchorage Technology

Copyright © 2022 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

当下,我国基础设施建设已驶入正轨,其建设力度稳中有升,并有望再创辉煌,许多结构新颖、大跨度的桥梁不断建成,这也标志着中国的桥梁建设水平处于世界前列。大跨度桥梁中,主要以悬索桥、斜拉桥为主要结构形式,而在该种桥梁体系中,拉索是重要的承载构件,关系到桥梁的使用寿命和运营安全。但现如今,普遍用的钢索缆有着三大技术瓶颈,易腐蚀、自重重大,垂度效应大,并且在桥梁服役期间的维修成本高,对交通带来了诸多不便,介于此用 CFRP 拉索就可以完美解决这一系列问题,不仅在保证有足够承载力的同时增大跨度,并且能够防止拉索因外部环境而发生锈蚀。但由于 CFRP 是各向异性材料,它的抗剪强度较低,抗拉强度高,所以用传统的锚具来锚固 CFRP 会使其发生剪切破坏,从而导致 CFRP 拉索失效[1] [2] [3]。从而可见,在 CFRP 拉索的应用中,锚固技术是成败的关键。为了充分发挥 CFRP 的力学性能,国内外学者做了诸多研究,在此领域中有了不错的进展。本文主要是结合 CFRP 的研究现状,对锚固技术的研究和结论进行了归纳与总结,为工程实际和锚具性能研究提供参考资料[4] [5] [6] [7]。

2. CFRP 材料的锚固特点

根据不同形式的索体,其对应的锚具就有所改变。目前 CFRP 拉索的锚固形式主要有四种:自锚型锚具锚固、摩擦型锚具锚固、粘结型锚具锚固、复合型锚具锚固[8] [9] [10] [11]。

2.1. 自锚型锚具锚固

自锚型锚具如图 1,一般用于层压 CFRP 板索或者非层压 CFRP 板索的锚固,这种锚固体系是将 CFRP 片材缠绕在两端。Ai Pengcheng [12]等人讨论了 CFRP 环的半径大小和厚度的不同对自锚型锚具的锚固效率和 CFRP 拉索承载能力的影响,并证明了在原有基础上对锚具进行改进后的自锚型锚具的锚固效率能够达到 95%以上,根据虽然这种锚固方式结构简单,且锚固效率高,但制作工艺有所难度,索体的长度也会有所限制。

2.2. 摩擦型锚具锚固

目前,摩擦型锚具已经用于工程实例,随着在 CFRP 索体锚固领域的不断探究,CFRP 索体的形式也有所改变,在传统的认知里,索体一般为棒材,但对于棒材型 CFRP 索体锚固的研究多年以来未有明显突破。挤压套筒锚具[13]是摩擦型锚具的一种,它是由锚具与索体接触面上的相互作用而产生的摩阻力来锚固 CFRP 索体。在索体张拉时,CFRP 索体会受到表面的挤压,随着张力越大,挤压作用越大,接触面之间的摩擦力就会越大,很容易导致套筒发生形变[14]。当张拉到一定限度时,在挤压套筒锚具的前端会发生应力集中,就会降低锚具的锚固性能,因而不能完全发挥出 CFRP 材料良好的抗拉性能。

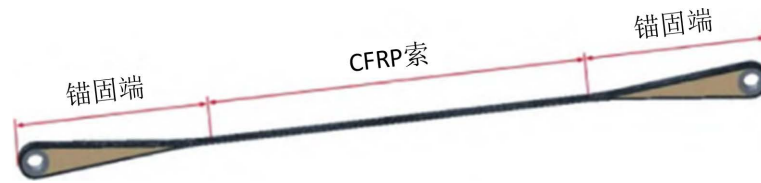


Figure 1. Schematic diagram of self anchored anchorage [12]

图 1. 自锚型锚具示意图[12]

运用截面为矩形的片材型索体则可以避免这种情况。该种形式的索体可以根据不同的承载要求来增加或减少 CFRP 片材的层数，同时也能够将 CFRP 片材端部进行有效锚固。这就需要波形齿夹具锚，如图 2、图 3。它是锚固 CFRP 片材的专用锚具。波形夹具锚由上波形齿板和下波形齿板以及螺栓螺帽等组成，在波形夹具锚在相邻两层的 CFRP 板之间应加入波形完全吻合的加劲板，并且每个接触面之间都需要涂抹胶水将其粘接在一起，然后再用螺栓等锁定构件将波形夹具锚压紧锁定形成一个整体[15] [16] [17] [18] [19]。

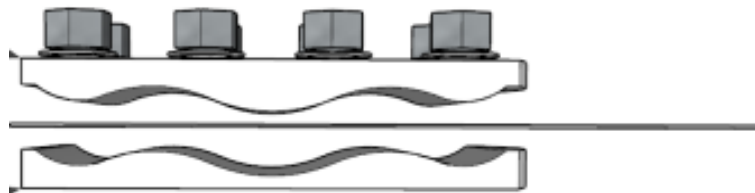


Figure 2. Schematic diagram of waveform clamp anchors

图 2. 波形夹具锚示意图



Figure 3. Schematic diagram of CFRP waveform anchor cable system

图 3. CFRP 波形锚拉索系统示意图

2.3. 粘结型锚具锚固

在锚固 CFRP 材料一定要避免弯折和受剪，否则会极大地降低锚固的性能。传统的粘结性锚具一般为两种，如图 4，分别为直筒式粘结型锚具和内推式粘结型锚具[19]。这两种锚具介质材料相同，一般为环氧树脂胶，都是对 CFRP 筋进行锚固。粘结型锚具通过粘结介质和 CFRP 筋的相互摩擦力、介质材料所产生的化学胶结力和两者粗糙表面所产生的机械咬合力[20] [21]来进行有效夹持。直筒式粘结型锚具所锚固的 CFRP 筋受到表面法向的压力较小，因此粘结力较小，一般来说直筒式锚具相较于其他锚具，长度较长，所占用的空间大，在实际工程的应用中有所局限；而内推式粘结型锚具内部有一定倾角，在张拉过程中，越靠近锚具的前端部分受到的挤压力就越大。当拉力达到一定限度，则会出现应力集中现象，索体表面就会有一定程度的损坏或脱离介质，使得锚具前端的 CFRP 筋与内壁发生相对滑移，且 CFRP 筋会受到剪力作用，从而导致锚固失效[22] [23] [24] [25] [26]。

2.4. 复合型锚具锚固

复合型锚具是结合了摩擦型和粘结型锚具的优良特性，不仅能够将 CFRP 材料有效夹持，减少相对

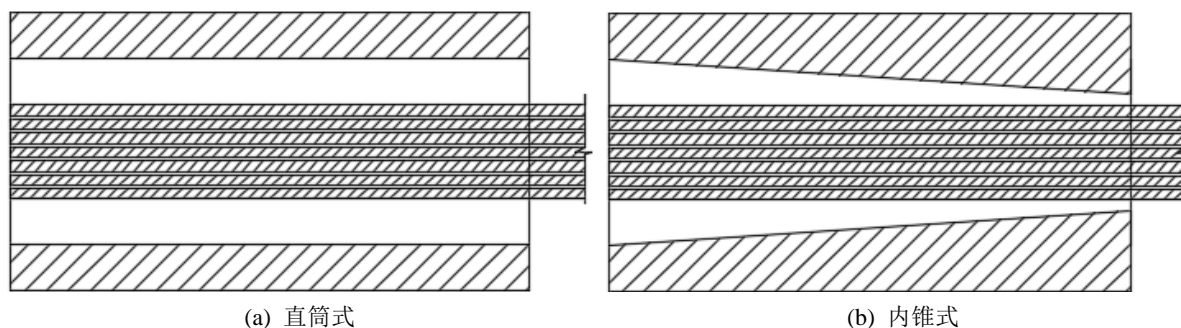


Figure 4. Adhesive anchorage [26]

图 4. 粘结型锚具[26]

滑移量, 并且也能够避免对 CFRP 材料的受剪和破坏。但是复合型锚具需要两种类型的锚具结合, 因此所占用的空间较大, 并且在实际的运用中, 复合型锚具的施工工艺较为繁琐, 目前在该领域内的研究还在继续, 具有未来可行性[25]。

3. CFRP 索锚固技术研究现状

众多学者分析了 CFRP 索股粘结型锚具的锚固原理[26]-[31], 候苏伟[26]提出了 CFRP 股索轴向拉应力未均匀分布, 并通过轴向静力拉伸试验, 对锚具的锚固性能进行研究。结果表明预紧力的大小与锚固性能有直接的影响, 丝间距越小则锚固效率越高。通过对受荷端部真空处理以及对自由端施加预紧力的手段进行锚具的改进, 锚具的极限荷载能力将增加至 857.2 kN, 锚固系数提升至 101.1%。

为了最大限度发挥 CFRP 材料的特性, 梅葵花和孙亚民[22]等人设计了新型的机械夹持 - 粘结型复合锚具, 考虑长度、介质、是否设置夹片等因素, 共设置 6 组锚具进行试验。试验结果表明: 这 6 组锚具的锚固效率都达到了 90% 以上, 且都是由于 CFRP 筋破断破坏而导致锚具失效; 合适的锚固长度为 CFRP 筋直径的 30~40 倍; 掺入适当的黏结介质将能够提供锚固性能, 但是继续大量加入, 则会降低锚固性能 [29] [30] [31] [32]。

卓静团队[14] [15] [16] [17] [18]的波形夹具锚, 这种锚具能够运用于大跨空间结构。当波形夹具锚需要满足较大承载力时, 该种锚具可夹持多层 CFRP 片材来满足所需要的承载力。波形夹具锚是依靠摩擦效应、粘接效应和弯曲效应来对 CFRP 片材进行锚固, 这种夹持方式不会出现横向剪切力集中的情况, 合理避开了 CFRP 的抗剪能力不足的缺点, 极大发挥了抗拉性能。这种锚具利用波形的原因是在锚具的有限长度内可以增大锚具与 CFRP 片材的接触面积, 并结合这种波形表面增大了摩擦力和粘接力。由于 CFRP 材料的抗剪性能较差, 因此波形夹具锚的凹凸缘的弧度不宜过大, 不然会导致 CFRP 拉索系统在受到张拉时未达到抗拉强度而因受剪力作用提前破坏。

Xin-jun Zhang 和 Lei-dong Ying [33]用 CFRP 材料为索体, 设计了一座悬索桥和斜拉桥, 通过三维非线性气动稳定性分析, 将测得的数据进行了数值研究。结果证明了, 用 CFRP 拉索的比传统钢拉索有更优的气动稳定性, 也表明在风荷载作用下, CFRP 拉索在索承式桥梁中的运用具有可行性。

在桥梁工程中, 索体的破坏原因之一是由于车辆与落石的冲击作用, 为了探究 CFRP 索体在纵向冲击作用下的力学性能及破坏形式[34] [35] [36], 因此方志[37]等人用粘接性锚具锚固 CFRP 索体, 做了纵向冲击试验, 试验表明: 在荷载作用下, 对 CFRP 索体的冲击作用的破坏形式是因为试件产生相对滑移, 索体表面的损伤较轻, 并且 CFRP 索体与锚具内部介质的相对滑移量会随着锚固长度的提高而增大; 用尺寸大小相同的粘接性锚具, 粘结强度在冲击作用下相较于恒载作用明显降低。最后得到了粘结型锚具动态粘结强度与 CFRP 索体尺寸和锚固长度的关系式, 并且阐明了临界锚固长度与索体尺寸及套筒内壁

与轴心夹角的关系, 得出了临界锚固长度公式[38]-[44]。

随着众多学者在 CFRP 领域深入研究, CFRP 索体逐步运用于大跨空间结构, 因此大吨位 CFRP 索体的研究十分重要。梅葵花[45]等人对下的大吨位 CFRP 筋加载, 探究其锚固性能, 将 CFRP 拉索张拉至 1455 kN, 得到了 CFRP 筋的所受的拉力与应变、滑移量的关系。通过试验可得, 大吨位的 CFRP 拉索在失效时, 一般会出现 CFRP 筋与介质发生滑移和锚具端部会因为挤压而破坏的现象, 提出了增加锚具的锚固长度, 就增大了 CFRP 筋与胶体的接触面积, 锚具的锚固效率将会有所提高的猜想。为研究大吨位 CFRP 索体的锚固参考价值[46] [47] [48]。

为了探究温度的不同, Fei Zhou 和 Jiwen Zhang [49]探究了 8 mm 直径的 CFRP 筋在稳态和瞬态下的力学性能以及变形, 实验表明: CFRP 材料在 324℃强度保留 50%, 稳态实验中, CFRP 临界温度为 324℃。苏捷[50]等人探究了 CFRP 筋的锚固的影响因素, 对高温下的粘结型锚具锚固的 CFRP 筋进行了力学性能分析, 将试件分别在 100℃、210℃、300℃和常温下进行试验, 通过试验表明, CFRP 筋的抗拉强度和弹性模量会因为温度的升高而有所下降, 且温度越高, 影响就越明显。CFRP 筋与内壁的粘结强度与温度呈负相关, 相对滑移量也会有所提升, 并建立了在高温下粘结型锚具的锚固性能退化的公式[51] [52] [53]。

4. 结论

对 CFRP 索体锚固技术现状总结如下:

1) 对于粘结型锚具, CFRP 拉索系统在张拉时, 当拉力过大, 锚固端会出现相对滑移现象, 其原因是锚具前端因应力集中, 索体受到剪力作用而导致锚具锚固失效。对于摩擦型锚具, CFRP 锚固失效是由于摩擦力和挤压力过大会损坏索体表面。

2) 目前所研究的锚具虽然对 CFRP 索体均能够有效夹持, 但是所夹持的吨位有所限制, 对高温、冲击等极限情况下有一定局限性, 且锚具的尺寸合理性、锚具的安装工艺还有进步的空间。

目前, 对 CFRP 锚固技术的问题做了大量研究和探讨, 但还是存在一定的局限性:

第一, 在现实环境中, CFRP 拉索服役于复杂工况下, 因此试验可以在原有的基础上同时加入多种条件进行研究, 试验结果与数据将会与实际工况更符合。

第二, 目前的实验仅仅是一个短期的加载过程, 而对长期的张力作用下的研究鲜有报道。

第三, CFRP 锚固技术的成败是整个拉索系统的关键, 若得以有效解决, 就能够提高桥梁的跨度, CFRP 索体将能更广泛运用到大跨空间的工程应用中。

基金项目

重庆科技学院硕士研究生创新计划项目(项目批准编号: YKJCX2120612)。

参考文献

- [1] 叶列平, 冯鹏. FRP 在工程结构中的应用与发展[J]. 土木工程学报, 2006, 39(3): 24-36.
- [2] 岳清瑞. 我国碳纤维(CFRP)加固修复技术研究应用现状与展望[J]. 工业建筑, 2000, 30(10): 23-26. <https://doi.org/10.13204/j.gyjz2000.10.005>
- [3] 诸葛萍, 强士中, 侯苏伟. 碳纤维筋夹片式锚具参数试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2010, 45(4): 514-520.
- [4] Xie, G.-H., Yin, J., Liu, R.-G., et al. (2017) Experimental and Numerical Investigation on the Static and Dynamic Behaviors of Cable-Stayed Bridges with CFRP Cables. *Composites Part B Engineering*, **111**, 235-242. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.048>
- [5] Hollaway, L.C. (2010) A Review of the Present and Future Utilisation of FRP Composites in the Civil Infrastructure with Reference to Their Important In-Service Properties. *Construction and Building Materials*, **24**, 2419-2445. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.062>

- [6] Mufti, A.A. (2003) FRPs and FOSs Lead to Innovation in Canadian Civil Engineering Structures. *Construction and Building Materials*, **17**, 379-387. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(03\)00039-4](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(03)00039-4)
- [7] 詹界东, 杜修力, 邓宗才. 预应力 FRP 筋锚具的研究与发展[J]. 工业建筑, 2006(12): 65-68.
- [8] 王安妮, 刘晓刚, 岳清瑞. 碳纤维复合材料拉索的锚固体系及服役性能研究进展[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(9): 45-54. <https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2022.0089>
- [9] 季园园. CFRP 索在弦支结构中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2014.
- [10] Gimsing, N.J. and Georgakis, C.T. (2011) Cable Supported Bridges: Concept and Design. John Wiley & Sons, Ltd., Hoboken, 11-14. <https://doi.org/10.1002/9781119978237>
- [11] Xiang, Y., Fang, Z. and Fang, Y.W. (2017) Single and Multiple Impact Behavior of CFRP Cables under Pretension. *Construction and Building Materials*, **140**, 521-533. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.112>
- [12] Ai, P.C., Feng, P., Lin, H.W., et al. (2021) Novel Self-Anchored CFRP Cable System: Concept and Anchorage Behavior. *Composite Structures*, **263**, Article ID: 113736. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113736>
- [13] 牛延沼. 碳纤维筋和拉索用变刚度锚固系统研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021. <https://doi.org/10.27061/d.cnki.ghgdu.2021.003548>
- [14] 吴敬宇. 碳纤维拉索锚固体系及其性能研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018. <https://doi.org/10.27061/d.cnki.ghgdu.2018.000037>
- [15] 卓静, 李唐宁. FRP 片材波形齿夹具锚的原理[J]. 土木工程学报, 2005(10): 53-57+75.
- [16] 卓静, 李唐宁. 波形齿夹具锚和 U 型箍锚固作用的力学机理[J]. 中国公路学报, 2007, 20(3): 48-53. <https://doi.org/10.19721/j.cnki.1001-7372.2007.03.009>
- [17] 陈小英. 波形齿系统及其预拉 CFRP 带体外加固混凝土 T 形梁抗弯性能试验研究[D]: [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [18] 陈小英, 李唐宁, 黄音, 陈明政. 波形齿夹具张拉 CFRP 带的力学性能试验研究及夹具体系设计[J]. 工程力学, 2012, 29(1): 187-194+213.
- [19] 卓静. 高强度复合材料 FRP 片材波形齿夹具锚固系统及应用研究[D]: [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2005.
- [20] 刘荣桂, 李明君, 蔡东升, 刘德鑫. CFRP 筋锚固体系研究与应用现状[J]. 建筑科学与工程学报, 2012, 29(2): 14-20.
- [21] 梅葵花, 孙亚民, 孙晨然, 孙胜江, 任翔. CFRP 筋新型机械夹持-黏结型复合式锚具短期静力性能试验[J]. 中国公路学报, 2021, 34(1): 66-78. <https://doi.org/10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.01.007>
- [22] Zhang, B.R. and Benmokrane, B. (2002) Pullout Bond Properties of Fiber-Reinforced Polymer Tendons to Grout. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **14**, 399-408. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2002\)14:5\(399\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2002)14:5(399))
- [23] 王喆. CFRP 筋粘结型锚具锚固性能试验研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2017.
- [24] 蒋田勇, 方志. 极限状态时 CFRP 筋粘结式锚具粘结应力分布[J]. 公路交通科技, 2007, 24(12): 75-78+92.
- [25] Cai, D.-S., Yin, J. and Liu, R.-G. (2015) Experimental and Analytical Investigation into the Stress Performance of Composite Anchors for CFRP Tendons. *Composites Part B*, **79**, 530-534. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.05.014>
- [26] 侯苏伟, 龙佩恒, 诸葛萍, 刘明虎. CFRP 索胶粘型锚具锚固机理试验[J]. 中国公路学报, 2013, 26(5): 95-101. <https://doi.org/10.19721/j.cnki.1001-7372.2013.05.013>
- [27] 殷杰, 许峰, 余锐锋. 改进型碳纤维增强复合材料筋复合式锚具的锚固性能[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2019, 33(6): 512-517+536. <https://doi.org/10.13349/j.cnki.jdxbn.2019.06.006>
- [28] 黄政宇, 岑小艳, 柳红霞. 碳纤维筋与活性粉末混凝土粘结性能试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2006(1): 65-69. <https://doi.org/10.19713/j.cnki.43-1423/u.2006.01.014>
- [29] 方志, 梁栋. 单根碳纤维(CFRP)预应力筋粘结式锚具的试验研究[J]. 南华大学学报(理工版), 2004, 18(1): 35-37. <https://doi.org/10.19431/j.cnki.1673-0062.2004.01.009>
- [30] 陈华, 陈耀嘉, 谢斌, 王鹏凯, 邓娟妮. CFRP 筋粘结式锚固体系界面失效演化机制及粘结强度计算[J]. 吉林大学学报(工学版), 2020, 50(5): 1698-1708. <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxgxb20190621>
- [31] Benmokrane, B. and Zhang, B.R. (2000) Tensile Properties and Pullout Behaviour of AFRP and CFRP Rods for Grouted Anchor Applications. *Construction and Building Materials*, **14**, 157-170. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00017-9](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00017-9)
- [32] Zhang, K.Y., Fang, Z. and Nanni, A. (2016) Behavior of Tendons with Multiple CFRP Rods. *Journal of Structural En-*

- gineering*, **142**, 10. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001535](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001535)
- [33] Zhang, X.-J. and Ying, L.-D. (2007) Aerodynamic Stability of Cable-Supported Bridges Using CFRP Cables. *Journal of Zhejiang University Science A*, **8**, 693-698. <https://doi.org/10.1631/jzus.2007.A0693>
- [34] 张建东. CFRP 拉索系杆拱桥非线性静力性能研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2005.
- [35] 吕国玉. 碳纤维增强塑料预应力筋锚具的设计研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2003.
- [36] 吴振. 超大跨 CFRP 拉索斜拉桥力学性能分析[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2011.
- [37] 方亚威. 不同温度作用下碳纤维复合材料筋的静力和抗冲击性能研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2020. <https://doi.org/10.27135/d.cnki.gहुdu.2020.001673>
- [38] 王莉, 熊舒, 肇研, 杨利. T800 级碳纤维复合材料抗冲击性能[J]. *航空材料学报*, 2018, 38(5): 147-151.
- [39] 郭书峰, 诸葛萍, 孙莉莉, 徐玉林. 碳纤维复合材料筋-环氧树脂胶界面传力机理研究[J]. *工业建筑*, 2017, 47(4): 111-115. <https://doi.org/10.13204/j.gvjz.201704023>
- [40] 方志, 奉礼鑫, 方亚威, 王志伟, 蒋正文. 冲击作用下 CFRP 筋黏结式锚固系统力学性能的试验研究[J/OL]. *复合材料学报*, 1-12[2022-10-18]. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220811.001>
- [41] 王安妮, 岳清瑞, 刘晓刚. 碳纤维增强树脂基复合材料及其拉索抗低速冲击性能综述[J/OL]. *复合材料学报*, 1-12[2022-10-27]. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220615.001>
- [42] 康俊涛, 章豪. 落石撞击下钢混组合梁桥上部结构动力响应分析[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2021, 60(6): 36-42. <https://doi.org/10.13471/j.cnki.acta.snus.2020.04.21.2020b038>
- [43] 张羽. 大跨混凝土斜拉桥断索后结构受力性能及倒塌破坏研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2020. <https://doi.org/10.27135/d.cnki.gहुdu.2020.002215>
- [44] 黄道斌. 碳纤维拉索的温度效应及车撞响应研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2019. <https://doi.org/10.27135/d.cnki.gहुdu.2019.000100>
- [45] 梅葵花, 李雪, 李宇, 邢丽丽, 孙胜江. 大吨位 CFRP 拉索锚固系统静力性能研究[J]. *中国公路学报*, 2022, 35(2): 76-87. <https://doi.org/10.19721/j.cnki.1001-7372.2022.02.006>
- [46] 冯博. 大吨位 FRP 拉索锚固体系及长期性能研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 东南大学, 2019.
- [47] 汪昕, 周竞洋, 宋进辉, 吴智深. 大吨位 FRP 复合材料拉索整体式锚固理论分析[J]. *复合材料学报*, 2019, 36(5): 1169-1178. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180725.002>
- [48] 宋进辉. 大吨位 FRP 拉索整体锚固体系优化设计及性能评价[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2017.
- [49] Zhou, F., Zhang, J.W., Song, S.T., *et al.* (2019) Effect of Temperature on Material Properties of Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Tendons: Experiments and Model Assessment. *Materials*, **12**, Article No. 1025. <https://doi.org/10.3390/ma12071025>
- [50] 苏捷, 李权浩, 方志, 蒋正文, 方川, 王志伟. 高温下 CFRP 筋及其黏结型锚固系统的力学性能[J/OL]. *复合材料学报*, 1-11[2022-10-18]. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20211214.003>
- [51] 方川. CFRP 拉索及其粘结型锚固系统抗火性能的试验研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2021. <https://doi.org/10.27135/d.cnki.gहुdu.2021.001906>
- [52] 方志, 方川, 蒋正文, 王志伟, 李俊宇, 张玉庆. 高温后 CFRP 筋及其粘结式锚固系统的力学性能[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(12): 4031-4041. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210215.005>
- [53] Wang, K., Young, B. and Smith, S.T. (2011) Mechanical Properties of Pultruded Carbon Fibre-Reinforced Polymer (CFRP) Plates at Elevated Temperatures. *Engineering Structures*, **33**, 2154-2161. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.03.006>