

CFRP材料高温下力学性能和防火保护研究综述

毕文彬, 罗德康, 陈柏宏, 汤凯菱, 孙权伟, 鲁 鹏

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15日; 发布日期: 2022年11月22日

摘 要

碳纤维增强复合材料(CFRP)与传统建筑材料相比性能优异,在建筑结构加固技术中已经十分成熟。目前,碳纤维增强复合材料作为拉索在大跨空间结构及桥梁领域已有应用,由于树脂基体对温度的敏感性,在超过玻璃化温度(Tg)后会软化甚至分解,导致CFRP材料在高温时性能会有所降低,对结构安全性产生不利影响。本文总结了国内外学者对CFRP材料高温下力学性能的试验和研究结论,提出了一些存在的缺陷以及进一步的研究方向,为后续研究提供参考。

关键词

CFRP, 高温

Review of Mechanical Properties and Fire Protection of CFRP Materials at High Temperature

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

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

Received: Oct. 16th, 2022; accepted: Nov. 15th, 2022; published: Nov. 22nd, 2022

Abstract

Compared with traditional building materials, carbon fiber reinforced polymer (CFRP) has excellent performance, and has been very mature in building structure reinforcement technology. At present, carbon fiber reinforced composites have been used in large-span space structures and bridges as cables. Because of the temperature sensitivity of the resin matrix, it will be softened or even decomposed after exceeding the glass transition temperature Tg, resulting in the reduced performance of CFRP materials at high temperatures, which will adversely affect the structural safety. This paper summarizes the test and research conclusions of domestic and foreign scholars on the mechanical properties of CFRP materials at high temperatures, and puts forward some existing defects and further research directions, providing reference for further research.

Keywords

CFRP, High Temperature

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

近年来,纤维增强聚合物复合材料(FRP)在全球各地土木结构中的应用显著增加。与钢、铝等传统建筑材料相比,纤维复合材料具有更高的比强度和刚度、高抗疲劳和耐腐蚀性能以及更轻的自重,将 CFRP 缆索作为主要承拉构件应用于大跨度桥梁的前景良好。如图 1 和图 2 所示,CFRP 板和 CFRP 筋是两种主要类型。碳纤维在绝氧条件下可承受的温度高达 2000℃,由于树脂基体的耐热性较差,当环境温度高于树脂基体的玻璃化转变温度(T_g)时,CFRP 材料强度将急剧下降。

贾玉莲[1]的研究表明,油罐车火灾燃烧迅速,辐射力强,火焰中心温度可高达 1400℃,对结构危害巨大。对此,国内外研究人员针对钢绞线和 CFRP 高温下的力学性能做了大量研究。本文仅针对 CFRP 高温下的力学性能和防火保护措施总结了国内外研究人员的研究成果,并提出存在的缺陷和进一步的研究方向。



Figure 1. Carbon fiber board

图 1. 碳纤维板



Figure 2. Carbon fiber reinforced

图 2. 碳纤维筋

2. CFRP 的高温特性试验研究

针对 CFRP 筋材和板材高温力学性能试验与钢绞线的高温力学性能试验方法相同, 主要有稳态实验和瞬态试验两种方式[2] [3] [4] [5]。稳态试验是指先将温度按一定升温速率升至目标温度并保持一段时间, 再按控制位移的方式进行拉伸破断试验。瞬态试验是指 CFRP 材料在有一定应力水平的前提下按一定升温速率升温至发生破断。

但 CFRP 材料和钢绞线高温下的力学性能差异较大, 如图 3 所示[6] [7]。在 170℃之前, 钢绞线高温下力学性能要优于 CFRP 材料; 在 200℃之后, 二者的抗拉强度随温度的升高均呈下降趋势, 但 CFRP 的下降速率要小于钢绞线且在同一目标温度下 CFRP 的强度要高于钢绞线, 说明 CFRP 材料高温下力学性能较钢绞线优异。

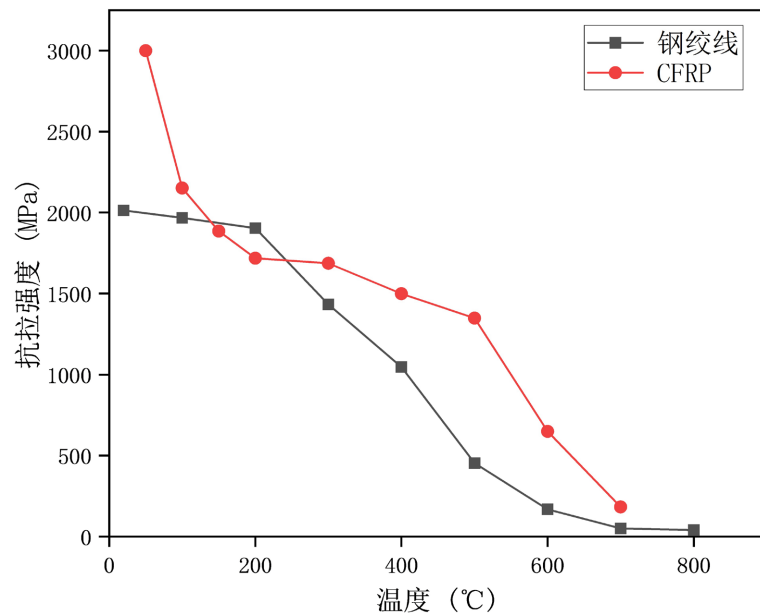


Figure 3. Comparison of strength change between CFRP and steel strand at high temperature

图 3. CFRP 与钢绞线高温下强度变化对比

为了研究 CFRP 材料高温下力学性能, 国内外学者采用稳态试验和瞬态试验做了大量研究。周飞[8]通过恒载升温 and 恒温加载的方式研究了 CFRP 筋在高温下的力学性能。稳态试验中, CFRP 筋在 500℃时的抗拉强度仅为室温时的 16.9%, 而瞬态试验中 CFRP 筋在 468℃时就丧失承载能力。通过对试验结果的分析, 周飞[8]认为稳态和瞬态试验的结果差距很小。而 Zhou 等[9]与周飞[8]的观点不同, 其认为 CFRP 筋的瞬态试验结果略高于稳态试验结果并更能代表实际的火灾现场。Zhou 等[9]对直径为 8 mm 的 CFRP 筋在稳态和瞬态试验下的纵向热膨胀变形及力学性能进行了研究。研究表明, CFRP 筋在高温下纵向收缩变形, CFRP 筋在瞬态试验中在 341℃时仍保留 50% 的强度, 在稳态试验中残余此强度时的温度为 324℃。

从周飞[8]、Wang K. [10]、方川[11]和 Yu [12]的试验结果来看, 如图 4 所示, CFRP 材料的抗拉强度随着温度的升高呈线性减小。350℃时, 材料的抗拉强度约为常温时的 45%; 当温度高于 350℃后材料强度急剧下降, 且性能变得不稳定; 700℃时材料强度完全丧失。

造成以上研究人员试验结果差异性的因素可能是树脂基体种类和生产工艺不同, 环氧树脂的分解温度会对 CFRP 材料在高温下的强度造成较大影响[10]。Bisby 等[13]研究了将 CFRP 板分别升温到 100℃,

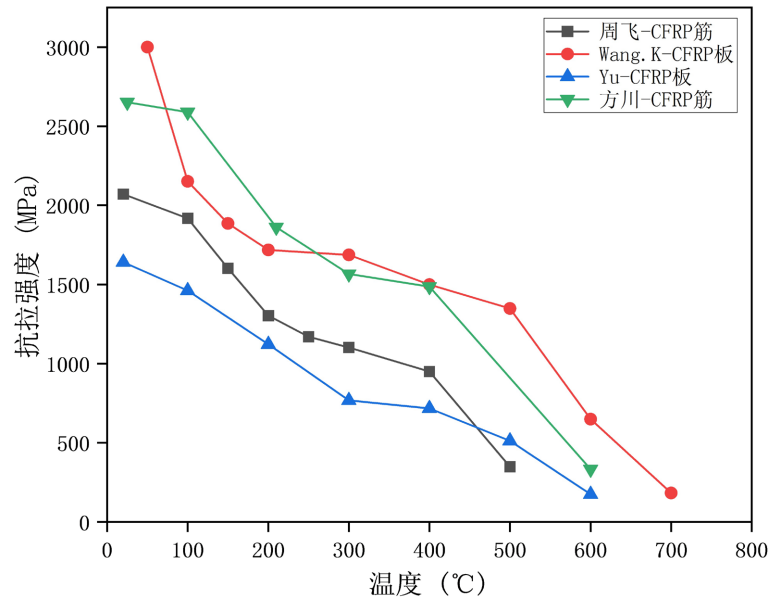


Figure 4. The tensile strength of CFRP material varies with temperature
图 4. CFRP 材料抗拉强度随温度的变化

200°C, 300°C, 400°C并保温 3 h 后冷却至室温材料的残余强度。研究表明, 环氧树脂胶的分解温度大小对 CFRP 板的力学性能影响较大, 而环氧树脂胶的玻璃化温度对材料影响较小。

CFRP 材料在高温下除了应力会有所下降外, 弹性模量也会下降, 这一现象可能是树脂基体在高温下分解后, 碳纤维的伸长量减小导致的。方川[11]、Yu [12]、Wang [7] [14] [15]研究了高温下 CFRP 材料弹性模量的变化规律, 如图 5 所示。结果表明 CFRP 弹性模量随温度升高呈下降趋势。350°C 是 CFRP 材料的关键温度, 在 350°C 以上时, CFRP 材料的弹性模量较常温下降了约 50%, 而当温度达到 600°C 及以上时, 其弹性模量基本丧失。

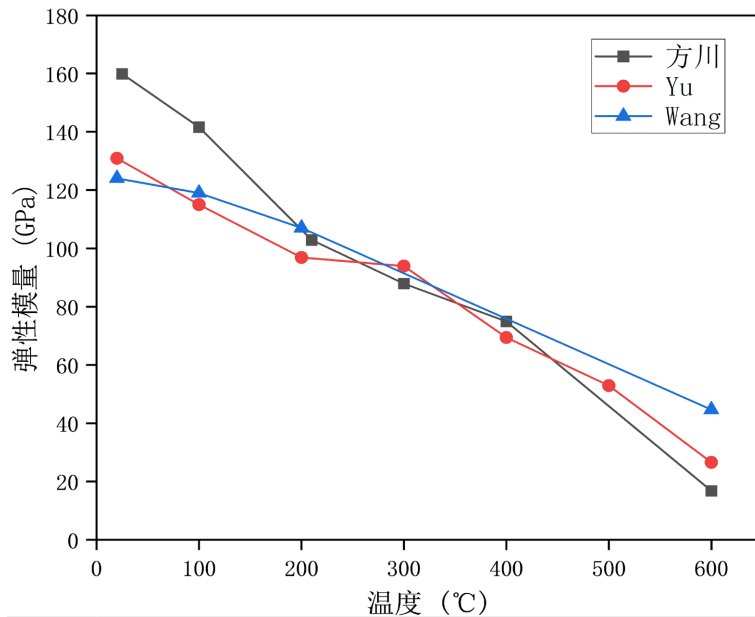


Figure 5. Variation of elastic modulus of CFRP material with temperature
图 5. CFRP 材料弹性模量随温度的变化

而 Wang K. [10]等对 CFRP 板在 20℃~700℃温度范围内进行了稳态试验研究,并总结了 CFRP 板在高温下的 4 种破坏模式,如表 1 所示,CFRP 板主要是以树脂基体高温分解后纤维断裂的方式发生破坏。试验结果表明 CFRP 筋的伸长量随温度的升高而降低,CFRP 板在 300℃时,其极限强度约为室温时的 50%;而 700℃时为 7%,与 Wang [7] [14] [15]的结论相比有小幅提升。

Table 1. Corresponding failure modes of CFRP plates in each temperature range

表 1. CFRP 板在各温度区间对应的破坏模式

温度	破坏模式
20~50℃	温度对试件影响较小,树脂基体未软化,主要以纤维断裂的方式破坏。
97~308℃	树脂基体软化甚至分解后试件承担荷载能力下降,以纤维断裂的方式破坏。
395~625℃	树脂基体在高温下完全分解,试件分散为纤维丝束,未发生破坏。
698~706℃	树脂基体在高温下完全分解,试件分散为纤维丝束,约一半的碳纤维被氧化。

3. CFRP 的防火保护措施及性能

目前钢拉索的外层防护结构主要由 PE 护套、PVF 氟化膜胶带和风雨螺旋线组成[16]。CFRP 的防火保护方式延续了钢缆索保护层的设计,通常在 CFRP 表面外涂防火涂料和包裹防火阻燃材料来限制 CFRP 表面温度,提高 CFRP 的耐火性能。防火涂料可以有效延长结构的耐火性能,为消防救援提供宝贵的时间,其厚度对结构的耐火时间有较大影响。工程中常用到的新型防火复材有石棉、天然纤维、岩棉等[17] [18] [19] [20],这些防火材料的性能和厚度对 CFRP 板耐火性能也有较大影响。国内外研究人员针对以上几个方面做了大量研究。

张国强等[21]对用无机胶将有防火保护的 CFRP 板粘贴在钢筋混凝土梁进行抗弯加固,并将温度升至 1000℃后 CFRP 板的性能进行了研究,结果表明,无机胶在高温下表现良好,CFRP 板不会与钢筋混凝土梁剥离,在火灾作用下,CFRP 板在火灾中暴露 90 min 仍有较好的加固性能。

徐志胜[22]和胡克旭等[23]研究了厚型防火涂料保护下的 CFRP 加固混凝土梁的防火性能。二者用不同厚度的厚型防火涂料对 CFRP 进行保护,并用钢丝网片约束 CFRP 表面防火涂层防止其脱落,结果表明,在高温作用下,厚型防火涂料可以增加加固梁的耐火时间,钢丝网片能够防止防火层的脱落。

Turkowski 等[24]研究了在两种不同厚度的防火材料保护下 CFRP 板加固梁在火灾下的受火性能,研究表明,防火层的厚度越大,防火效果越好,相同厚度的石膏比硅酸钙的防火性能要好,150 mm 厚的石膏可以保护 CFRP 加固梁 5 h,相同厚度的硅酸钙只能保护 3 h。

Carlos 等[25]研究了蛭石珍珠岩防火层、黏土层及硅酸盐水泥 3 种不同防火材料保护下的 CFRP 板加固梁在火灾下的受火性能,研究表明,50 mm 厚的蛭石珍珠岩防火层比黏土层以及硅酸盐水泥都要好,它们的保护时间分别为 120.3、51.7 以及 30.2 min。

徐玉林[26]和朱元林[27]等对陶瓷纤维外包的 CFRP 筋进行了高温试验。结果发现,在试验的前期阶段,加热炉内温度上升迅速,CFRP 筋表面温度缓慢上升;而在试验的后期,加热炉内温度上升变得缓慢,CFRP 筋外隔热材料部分发生氧化,其表面温度迅速上升,但试件表面温度远小于环境温度,说明陶瓷纤维有较好的隔热效果。

朱元林[27]还研究了不同厚度的石棉和防火涂料对 CFRP 筋耐火性能的影响。与其他研究不同的是该试验采用高温喷头的方式代替加热炉,可以更真实的模拟火灾工况。结果表明,60 mm 厚的石棉阻隔隔热效果最好,在经过 1000℃火焰灼烧 2 h 后强度仍有 3121 MPa,与室温时强度相比下降幅度较小。CFRP 筋在 2 mm 厚的防火涂料保护下受热 6 h,保护层表面温度为 1000℃,而筋材表面温度仅有 245℃,说明

2 mm 厚的防火涂料的隔热性能也比较优异。

4. 结论

对以上 CFRP 高温下力学性能和防火保护的研究, 总结如下:

1) CFRP 材料由于树脂基体对温度的敏感性, 强度随温度的升高呈线性下降, 弹性模量也会有所降低。破坏模式主要有树脂基体软化分解只剩下纤维增强体导致的强度降低和树脂分解后强度降低导致的纤维基体断裂。

2) 瞬态试验与稳态试验相比, 瞬态试验中试件有一定的初始应力, 更加符合真实工况。在现实应用场景中, CFRP 均处于持荷状态, 因此, 瞬态试验的结果更有参考价值。

3) 在 CFRP 表面涂敷防火涂料和包裹阻燃隔热材料可以将 CFRP 表面温度限制在安全温度范围内, 防止其在高温下强度的丧失。防火材料的厚度是 CFRP 耐火性能的主要影响因素之一, 钢丝挂网可以有效防止涂层的脱落。

目前, CFRP 高温下力学性能和防火保护的研究已较为完善, 但仍存在一定的缺陷:

第一, 上述试验研究都是通过加热炉来模拟火灾, CFRP 表面温度分布相对均匀。而在现实应用场景下由于火灾温度场的不均匀, CFRP 板表面温度也不是均匀分布的, 因此, 要考虑到在不同温度区域内采用不同的防火保护措施, 即设计抗火分级。

第二, 防火涂料和隔热阻燃材料的抗拉性能较差, 在进行 CFRP 张拉时易产生裂缝, 导致外部温度更容易影响到 CFRP 本身, 从而失去防火保护作用。另外, 过厚的防火层会增加索体直径, 影响外观, 增加成本, 也会对现场施工带来不便, 因此, 可研发或选用同时兼具抗拉强度和隔热效果的防火材料, 保证整个防火体系可以稳定工作。

第三, 虽然国内外研究人员对材料本身的高温性能和防火保护做了大量研究, 但鲜有对 CFRP 夹具和 CFRP 组成的拉索体系的高温性能的研究。在真实工况中, 拉索位于桥面的锚固端也在受火范围内, 因此, 后续工作可以研究整个拉索体系高温下的性能和防火保护。

参考文献

- [1] 贾玉莲. 油罐车火灾的数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 太原: 中北大学, 2010.
- [2] 张昊宇, 郑文忠. 1860 级低松弛钢绞线高温下力学性能[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(6): 861-865.
- [3] 李艳, 汪剑, 周国华. 大跨径悬索桥缆索体系抗火设计研究[J]. 公路, 2018, 63(5): 94-101.
- [4] 郑文忠, 胡琼, 张昊宇. 高温下及高温后 1770 级 Φ^5 低松弛预应力钢丝力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(2): 120-128. <https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2006.02.018>
- [5] 樊泽源. 高温下与高温后拉索力学性能试验研究与数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2018.
- [6] 杜咏, 孙亚凯, 李国强. 预应力钢绞线高温力学性能试验研究[J]. 工程力学, 2019, 36(4): 231-238.
- [7] Wang, Y.C., Wong, P.M.H. and Kodur, V. (2007) An Experimental Study of the Mechanical Properties of Fiber Reinforced Polymer(FRP) and Steel Reinforcing Bars at Elevated Temperatures. *Composite Structures*, **80**, 131-140. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2006.04.069>
- [8] 周飞. 火场温度作用下 CFRP 筋混凝土受弯构件的结构性能研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 东南大学, 2019. <https://doi.org/10.27014/d.cnki.gdnau.2019.003834>
- [9] Zhou, F., Zhang, J., Song, S., Yang, D. and Wang, C. (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>
- [10] 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>

- [11] 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.gghudu.2021.001906>
- [12] Yu, B., and Kodur, V. (2014) Effect of Temperature on Strength and Stiffness Properties of Near-Surface Mounted FRP Reinforcement. *Composites Part B: Engineering*, **58**, 51-517. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.10.055>
- [13] Bisby, L.A. and Foster, S.K. (2005) High Temperature Residual Properties of Externally-Bonded FRP Systems. *7th International Symposium on Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures*, Kansas, 6-9 November 2005, 1235-1252.
- [14] Wang, Y.C. and Kodur, V. (2005) Variation of Strength and Stiffness of Fibre Reinforced Polymer Reinforcing Bars with Temperature. *Cement & Concrete Composites*, **27**, 864-874. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.03.012>
- [15] Wang, Y.C., Wong, P.M.H. and Kodur, V. (2003) Mechanical Properties of fibre Reinforced Polymer Reinforcing Bars at Elevated Temperatures. *SFPE/ASCE Specialty Conference: Designing Structures for Fire*, Baltimore, MD, September 30-October 1 2003, 183-192.
- [16] 陈志敏, 阮荣涛. 斜拉索 PVF 氟化膜胶带缠包工艺及其应用综述[J]. 山西交通科技, 2017(1): 53-56.
- [17] 付正. 建筑施工中防火材料的应用探讨[J]. 低碳世界, 2021, 11(2): 231-232.
<https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-2066.2021.02.114>
- [18] 代妮娜. 探讨建筑施工中防火材料的应用[J]. 今日消防, 2020, 5(7): 35-36.
- [19] 潘月磊, 张和平, 闫明远, 何盼, 程旭东. 二氧化硅气凝胶及其在保温隔热领域应用进展[J/OL]. 化工进展.
<https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2022-0512>, 2022-10-28.
- [20] 宫学斌, 刘元军, 赵晓明. 热防护用气凝胶材料的研究进展[J]. 纺织学报, 2022, 43(6): 187-196.
<https://doi.org/10.13475/j.fzxb.20210308610>
- [21] 张国强, 邢建. CFRP 加固钢筋混凝土板耐火性能的试验研究[J]. 建筑技术开发, 2019, 46(9): 106-107.
- [22] 徐志胜, 冯凯, 张威振, 阳震宇. CFRP 加固钢筋混凝土梁火灾后的试验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(1): 98-100.
- [23] 胡克旭, 何桂生. 碳纤维加固钢筋混凝土梁防火方法试验研究[J]. 同济大学学报, 2006, 34(11): 1451-1456.
- [24] Turkowski, P., Lukomski, M., Sulik, P. and Roszkowski, P. (2017) Fire Resistance of CFRP-Strengthened Reinforced Concrete Beams under various Load Levels. *Procedia Engineering*, **172**, 1176-1183.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.137>
- [25] Carlos, T.B., Rodrigues, J.P.C., de Lima, R.C.A. and Dhima, D. (2018) Experimental Analysis on Flexural Behaviour of RC Beams Strengthened with CFRP Laminates and under Fire Conditions. *Composite Structures*, **189**, 516-528.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.01.094>
- [26] 徐玉林, 诸葛萍, 孙莉莉, 桑琴杨, 储焙宇. 桥梁 CFRP 缆索外包陶瓷纤维的防火性能研究[J]. 宁波大学学报(理工版), 2019, 32(2): 91-96.
- [27] 朱元林, 刘礼华, 黄盛彬, 朱维军, 朱小芳. CFRP 索阻燃防火措施[J]. 复合材料学报, 2022, 39(8): 3786-3793.
<https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210909.007>