

Review of Research on Concrete Structures Strengthened with CFRP Sheets Bonded with Inorganic Matrix

Fei Teng

College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai
Email: tengfei9916@163.com

Received: Jun. 24th, 2015; accepted: Jul. 8th, 2015; published: Jul. 13th, 2015

Copyright © 2015 by author and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

Abstract

Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) sheets have been widely used in civil engineering, however the softening points of organic adhesives are too low. So the innovative cementitious materials are used as adhesive for CFRP strengthening systems by scholars. This paper summarizes the progress of research on concrete structures strengthened with CFRP sheets bonded with inorganic matrix, including the mechanical properties of CFRP sheets and the performance of concrete structures strengthened with CFRP sheets bonded with inorganic matrix. Also this paper concludes with the existing problems in the application of inorganic matrix and proposes suggestion for further research.

Keywords

CFRP Sheets, Inorganic Matrix, Concrete Structure, Strengthening

用无机胶粘贴碳纤维布 加固混凝土结构研究现状

滕 飞

同济大学土木工程学院, 上海
Email: tengfei9916@163.com

收稿日期：2015年6月24日；录用日期：2015年7月8日；发布日期：2015年7月13日

摘要

碳纤维布(CFRP)已广泛应用于土木工程行业,但是所采用的环氧类有机胶的软化点过低。于是国内外学者采用无机胶粘贴碳纤维布加固混凝土结构。本文总结了近年来用无机胶粘贴碳纤维布加固混凝土结构的研究进展,包括材料的力学性能和用无机胶粘贴碳纤维布加固混凝土结构的力学性能。同时指出了无机胶应用过程中存在的问题,并展望了今后的研究发展趋势。

关键词

碳纤维布, 无机胶, 混凝土结构, 加固

1. 引言

混凝土结构是世界上普遍应用的建筑结构形式,我国大量工业厂房采用的是这种结构形式。混凝土结构在高温、腐蚀、潮湿等环境和荷载的共同作用下,结构性能会随着时间的推移而不断退化。在我国已有相当多的老旧混凝土厂房受到耐久性破坏的威胁,亟需对其进行加固和维修[1]。碳纤维复合材料(CFRP)凭借轻质高强、良好的耐腐蚀性、占用空间小和易于施工的优点,已被广泛用于建筑结构加固领域[2]。然而碳纤维布加固混凝土结构的耐高温性能较差,混凝土结构本身具有良好的耐高温性能。碳纤维材料本身在绝氧条件下具有良好的耐高温性能,抗拉强度在1000℃以内基本保持不变[3]。但目前常用的环氧树脂类有机胶的玻璃化温度一般为60℃~82℃,当达到这一温度后有机胶会发生明显的力学性能退化,粘结强度和刚度大幅降低,最终导致加固失效[4]。由于有机胶的耐高温性能较差,国内外众多规范对碳纤维加固技术的应用范围进行了限制,现在主要用于桥梁结构和对防火要求不高的工业和民用建筑结构。比如,我国《混凝土结构加固设计规范》(GB50367-2013)[5]规定采用粘贴FRP加固的混凝土结构长期使用的环境温度不应高于60℃。但某些混凝土结构会遇到高温的情况,如冶金厂房的高温车间,其结构常年处于高温辐射下,表面温度主要在20℃~150℃[6]。这些结构的表面温度超过有机胶的玻璃化温度,用有机胶粘贴碳纤维布加固的混凝土结构难以满足耐高温要求。因此,如何提高碳纤维布加固混凝土结构的耐高温性能从而扩大其适用范围成为一个有待解决的问题。

考虑到碳纤维布加固混凝土结构耐高温性能差的主要因素是环氧树脂类有机胶,国内外一些学者尝试采用耐高温的无机胶凝材料代替有机胶粘贴碳纤维布加固混凝土结构。本文总结近年来用无机胶粘贴碳纤维布加固混凝土结构的研究现状,并指出存在的某些还待完善的问题和该领域进一步的研究方向。

2. 材料的力学性能

2.1. 碳纤维布的力学性能

碳纤维在绝氧情况下具有良好的耐高温性能,升华温度高达3650℃左右。Bisby等[3]对不同种类纤维在高温下的力学性能进行了整理和总结,给出了各纤维材料抗拉强度和弹性模量随温度的变化规律,碳纤维抗拉强度在1000℃以内几乎不会降低。同时Bisby[3]还对各种纤维复合材料的抗拉强度和弹性模量随温度的变化进行了拟合,表明在200℃范围内CFRP抗拉强度降低不到20%。吴波[7]通过高温下碳纤维布的拉伸试验,试样全部是因碳纤维布被拉断破坏,所得高温作用下碳纤维布抗拉强度随温度的变化规律如图1所示。与常温相比,40℃、60℃和80℃下碳纤维布的平均抗拉强度分别下降了5.3%、23.3%

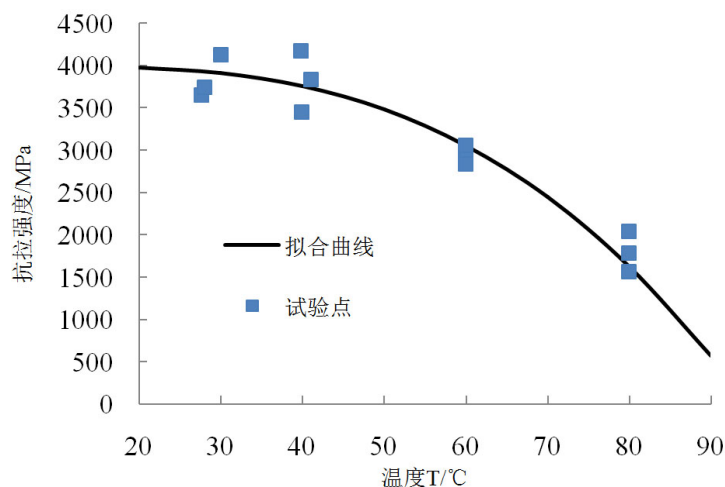


Figure 1. Variation of tensile strength of CFRP sheets with temperature
图 1. 碳纤维布抗拉强度随温度关系

和 53.2%。这表明高温下碳纤维与碳纤维之间基体材料的力学性能会退化，导致不同纤维之间作用明显减弱。文献[3]与文献[7]中 CFRP 随温度的变化规律不一致是由于两位学者采用不同 CFRP 材料的缘故，文献[3]中采用的 CFRP 筋，文献[7]中采用的是 CFRP 布，CFRP 布中作为基体的树脂在高温下失效从而导致碳纤维之间的共同作用明显减弱。

这表明作为碳纤维布的两个组成成分，碳纤维具有良好的耐高温性能，作为基体的树脂材料不耐高温，从而成为碳纤维布在高温下的薄弱部分。因此我们在高温环境下使用碳纤维布时，不能让碳纤维布直接暴露在空气中，表面应加有防护材料。

2.2. 粘结剂的力学性能

粘贴碳纤维布加固钢筋混凝土结构时，我们通常用环氧树脂类有机粘接剂将碳纤维布粘贴在混凝土表面。因此碳纤维布与混凝土能否共同工作就取决于粘接剂的力学性能。国内外大量试验研究表明，常温下一般只要保证施工质量，粘接界面的破坏都是发生在混凝土表面[8] [9]，碳纤维布能较好地发挥作用。根据这一破坏模式以及其他试验结果学者们用断裂力学的知识提出了不少粘接模型，这些模型能够很好地解释试验现象，但这些模型都是以常温下有机胶作为研究对象。

树脂类有机粘结剂在达到其玻璃化温度时力学性能会迅速退化，失去在碳纤维布和混凝土表面之间传递应力的能力。Klamer 等[10]对碳纤维布—混凝土界面的粘结性能进行了在 $-10^{\circ}\text{C}\sim 75^{\circ}\text{C}$ 范围内的双剪试验，试验结果表明，高温下有机胶的刚度和强度都会降低，粘贴面的应变分布更加均匀，峰值剪应力会减小，界面的承载力也会降低。吴波[7]也通过 7 组常温 $\sim 140^{\circ}\text{C}$ 范围内配套粘结剂的剪切试验，研究了粘结剂的力学性能随温度的变化规律，其试验结果及拟合曲线如图 2 所示。试验结果表明，随着温度的升高粘结剂的剪切强度总体上显著降低，主要降低幅度集中在常温 $\sim 80^{\circ}\text{C}$ 范围内。胡克旭等[11]进行了 $4^{\circ}\text{C}\sim 180^{\circ}\text{C}$ 范围内碳纤维-混凝土界面剪切试验，研究了不同温度下界面破坏形式、温度对胶体及碳纤维布的影响。试验结果表明，随着温度的升高粘结强度和剪切刚度都会降低，界面平均粘结应力—滑移关系近似为直线关系。以上三位学者都通过试验研究了高温下有机粘接剂的力学性能，试验结果都表明了高温下有机粘接剂的力学性能会退化。但 Klamer 试验的温度范围较小，吴波试验所采用的试验对象是钢板与有机粘接剂的界面性能而不是混凝土与有机粘接剂的界面性能，胡克旭试验并未直接测得粘贴面应变的分布。因此进一步指导实际工程应用还需要进一步研究。

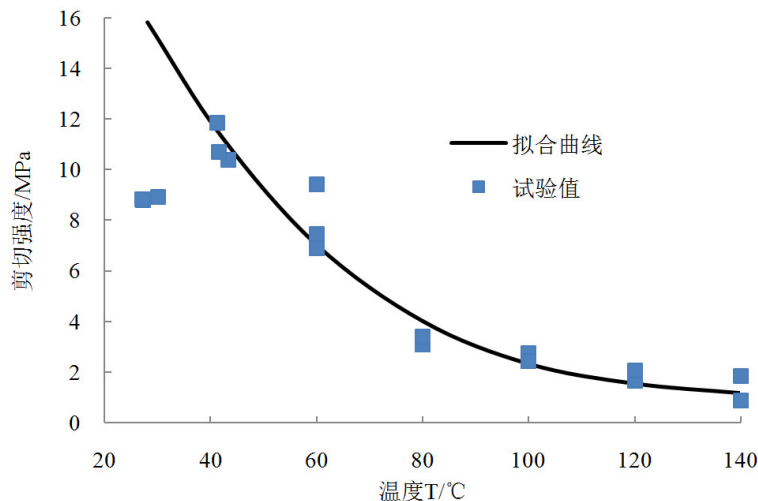


Figure 2. Variation of shear strength of adhesive with temperature
图 2. 粘接剂剪切强度随温度关系

而目前国内外对于采用无机胶粘贴碳纤维布与混凝土的界面性能研究非常少,吴波等[12]进行了 20℃~160℃ 范围内无机胶粘贴碳纤维布的水泥砂浆试块的双剪试验,比较了不同温度下无机胶和环氧树脂类有机胶的粘接性能,试验结果表明 80℃ 后采用无机胶粘贴试样的承载力高于有机胶粘贴试样,160℃ 时采用无机胶粘贴试样的承载力是有机胶粘贴试样的 4.8 倍左右。而且二者的破坏模式也不一样,无机胶粘贴试样破坏时碳纤维布仍牢牢粘贴在砂浆试块表面,有机胶粘贴试样破坏位置则为砂浆表层。这表明已有的粘接模型不再适用于无机胶粘贴,而且文献中也未给出无机胶粘贴的界面粘结模型。

3. 常温下无机胶粘贴碳纤维布加固混凝土结构的受力性能

目前用有机胶粘贴碳纤维布加固混凝土结构的研究非常广泛[13][14],我国也有相应的规范指导工程应用[5]。近年来国内外学者陆续开展了无机胶粘贴碳纤维布加固混凝土结构的研究工作,并取得了一定进展[15]-[21]。基于这些研究成果,无机胶粘贴碳纤维布加固混凝土结构的受力性能有以下特点:

1) 在竖向荷载作用下,无机胶粘贴加固梁受弯破坏类型主要有 5 种: a) 钢筋屈服后碳纤维布拉伸[15]-[18],这种破坏类型多是由于加固率较小和无机胶粘贴效果较好; b) 钢筋屈服后混凝土压碎[17],在加固率较大时有可能出现这种破坏形态; c) 碳纤维布与混凝土界面发生剥离破坏[12][18]-[20],在加固率较大时或者粘贴效果不好时可能出现这种破坏模式; d) 碳纤维布不同层之间发生分层剥离破坏[15][16],在碳纤维布层数较多时可能出现这种破坏模式; e) 碳纤维布横向断裂,断裂后的碳纤维布分成数条,无机胶对碳纤维布的浸润效果不好时可能出现这种破坏模式。

2) 与未加固梁相比,采用无机胶粘贴碳纤维布可以提高梁的承载力。如文献[15]试验结果表明,粘贴 3 层、4 层、5 层和 6 层碳纤维布的加固梁极限承载力相比未加固梁分别提高了 42.6%、49.2%、67.8% 和 70.2%,钢筋屈服时的承载力分别提高了 52.4%、70.2%、87.5% 和 95.9%。与有机胶粘贴加固梁对比,在加固率相同情况下,有的文献中二者对未加固梁承载力的提高幅度相近[16],也有无机胶粘贴加固梁提高的幅度明显不如有机胶粘贴加固梁[19],这可能是由于文献[16]与文献[19]采用的无机胶种类不同。

3) 梁截面尺寸、配筋率、混凝土强度等级一定时,加固率越大,承载力提高越明显。根据这一特点可以确定合理的加固率,从而最大限度发挥碳纤维布的作用。

4) 虽然加固梁的承载力有明显提高,但试件破坏前变形较小。随着碳纤维布加固率的增大,加固梁变形能力不断降低。文献[15]中无机胶粘贴加固梁的跨中最大位移相比未加固梁下降了 60% 左右。

5) 与未加固梁相比,无机胶粘贴加固梁的开裂荷载、开裂挠度和纵筋屈服前的刚度均与未加固梁相近。另外加固不仅可以减小裂缝宽度,而且可使梁的裂缝分布更均匀。

6) 加固梁跨中截面仍近似满足平截面假定,这为截面承载力分析带来便利。

综上可知,采用无机胶粘贴碳纤维布加固混凝土结构的承载力相比未加固梁有大幅提高,将无机胶代替有机粘结剂粘贴碳纤维布加固混凝土结构是有效的。Taljsten [20]指出无机胶对 CFRP 的浸润效果至关重要,直接影响加固梁的破坏模式和承载力。目前还没有统一的承载力计算公式,文献[17]给出的受弯承载力计算公式仅适用于受压区混凝土压碎这一破坏模式,文献[18]给出的受弯承载力计算公式仅适用于碳纤维布与混凝土界面剥离这一破坏模式。因此,本文建议采用如下的计算方法:a) 通过粘接试验确定有效粘贴长度和发生剥离破坏时承载力,即碳纤维布能达到的最大应变;b) 比较剥离破坏时碳纤维布最大应变和碳纤维布极限抗拉强度对应的应变,取较小值,然后根据平截面假定计算截面的受弯承载力。

4. 高温下无机胶粘贴碳纤维布加固混凝土结构的受力性能

目前国内外学者多是通过抗火试验研究高温下无机胶粘贴碳纤维布混凝土结构的受力性能。郑文忠等[22]进行了5块用无机胶粘贴碳纤维布加固混凝土板的抗火试验。试验分别采用厚型隧道防火涂料和厚型钢结构防火涂料对其进行保护。试验结果表明,试验中粘贴碳纤维布的无机胶历经的最高温度均高于有机胶的玻璃化温度,火灾后碳纤维布与混凝土仍粘结完好,因此合理的防火保护和耐高温无机胶能使火灾下碳纤维布与混凝土板有效共同工作。另外试验还发现厚型隧道防火涂料防火效果优于厚型钢结构防火涂料。

张婷婷等[23]也进行了3根碳纤维布加固梁的抗火试验,其中试件 L1 采用无机胶粘贴碳纤维布加固且没有防火保护,试件 L2 采用有机胶粘贴碳纤维布加固并有防火保护,试件 L3 采用无机胶粘贴碳纤维布加固并有防火保护。试验结果表明,对有防火涂料的两根试验梁,混凝土截面、钢筋等部位的时温曲线基本一致,表明无机胶与有机胶有类似的导热性能,没有防火涂料的梁表面、截面及胶层温度上升迅速且最高温度更高。试验结束后发现无机胶粘贴的 CFRP 与混凝土尚存在一定的粘结,而采用有机胶粘贴的 CFRP 布呈丝状与混凝土完全失去粘结,这表明无机胶具有更加良好的耐高温性能。

综上可知,采用无机胶粘贴碳纤维布可以保证碳纤维布与混凝土共同工作,耐火性能优于采用有机胶粘贴的加固试件,表明高温下采用无机胶粘贴碳纤维布加固混凝土结构是有效的,目前还没有关于高温下加固梁承载力的计算公式。

5. 进一步的研究方向

近些年国内外学者对无机胶粘贴碳纤维布加固混凝土结构进行了试验研究,试验结果表明采用无机胶作为粘结剂可以提高混凝土结构的承载力,常温下的加固效果与环氧类有机胶接近,高温下的加固效果明显优于有机胶。因此采用无机胶代替有机胶粘贴碳纤维布加固混凝土结构从而提高其耐高温性能是可行的。虽然现阶段成果比较显著,但还存在一些问题有待继续深入解决。

1) 无机胶对碳纤维布的浸润效果一般,这导致无机胶粘贴的碳纤维布—混凝土界面粘贴强度相比有机胶粘贴有所降低。以后可以进一步研究如何提高无机胶对碳纤维布的浸润效果,这个可能涉及到无机胶的制备过程。

2) 目前对无机胶粘贴碳纤维布加固混凝土结构的力学性能研究多是基于构件的研究,比如研究加固板、柱和梁等在常温和高温下的宏观力学性能。而对无机胶粘贴的碳纤维布—混凝土界面的粘结性能研究较少,某些文献提及这方面也仅限于界面的平均粘贴强度,缺乏关于碳纤维布—混凝土界面的微观破坏机理以及界面应力应变分布规律的研究。已有的粘结强度模型都是基于采用有机胶作为粘结剂,需要

进行这方面的研究,建立常温和高温下采用无机胶粘贴碳纤维布与混凝土间的界面模型,从而进行更为精确的非线性有限元分析,也可以为构件的加固提供依据。

3) 目前无机胶粘贴碳纤维布加固混凝土结构在高温下的力学性能研究基本都是通过抗火试验,引入了防火材料等影响因素。而对于一般高温条件(比如 60℃~150℃)下的加固构件研究较少。今后可以研究在一般高温条件下无机胶加固混凝土结构的力学性能,从而可以将碳纤维布加固混凝土结构应用到一些工业厂房的加固维修上,开拓其使用范围。

参考文献 (References)

- [1] 林志伸, 惠云玲 (1997) 我国工业厂房混凝土结构耐久性的宏观调研. *工业建筑*, **6**, 2-6, 54.
- [2] 滕锦光, 等 (2005) FRP 加固混凝土结构. 中国建筑工业出版社, 北京.
- [3] Bisby, L.A. (2003) Fire behavior of FRP reinforced or confined concrete. Ph.D. Thesis, Queen's University, Kingston.
- [4] Cree, E.U., Chowdhury, M.F. and Green, L.A. (2012) Performance in fire of FRP-strengthened and insulated reinforced concrete columns. *Fire Safety Journal*, **54**, 86-95. <http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2012.08.006>
- [5] 四川省建筑科学研究院 (2013) GB50367-2013 混凝土结构加固设计规范. 中国建筑工业出版社, 北京.
- [6] 冶金工业部建筑研究院结构室 (1975) 冶金工厂热车间的结构抗热问题. *冶金建筑*, **4**, 23-30.
- [7] 吴波, 万志军 (2005) 碳纤维布及胶粘剂的高温强度研究. 第三届全国钢结构防火及防腐暨第一届全国结构抗火学会交流会. 福州大学土木工程学院, 福州, 386-393.
- [8] 姚谏, 滕锦光 (2003) FRP 复合材料与混凝土的粘结强度试验研究. *建筑结构学报*, **5**, 10-17, 23.
- [9] 冯展磊, 顾祥林, 张伟平, 刘丽梅 (2008) 碳纤维布与混凝土间粘结性能试验研究. *结构工程师*, **4**, 110-114.
- [10] Klamer, E.L., Hordijk, D.A. and Janssen, H.J.M. (2005) The influence of temperature on the debonding of externally bonded CFRP. SP-230-88, fib-Task Group 9.3, 1551-1570.
- [11] 胡克旭, 卢凡, 蔡正华 (2009) 高温下碳纤维混凝土界面受剪性能试验研究. *同济大学学报(自然科学版)*, **12**, 1592-1597.
- [12] 吴波, 房帅, 冯玮 (2012) 采用地聚物粘贴碳纤维布加固混凝土梁试验研究. *建筑结构学报*, **1**, 111-118.
- [13] 吴刚, 安琳, 吕志涛 (2000) 碳纤维布用于钢筋混凝土梁抗弯加固的试验研究. *建筑结构*, **7**, 3-6, 10.
- [14] 徐福泉 (2001) 碳纤维布加固钢筋混凝土梁静载性能研究. 博士论文, 中国建筑科学研究院, 北京.
- [15] Toutanji, H., Zhao, L. and Zhang, Y. (2006) Flexural behavior of reinforced concrete beams externally strengthened with an inorganic matrix. *Engineering Structures*, **3**, 557-566. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.09.011>
- [16] Toutanji, H. and Deng, Y. (2007) Comparison between organic and inorganic matrices for RC beams strengthened with carbon fiber sheets. *Journal of Composites for Construction*, **11**, 507-513. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2007\)11:5\(507\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2007)11:5(507))
- [17] 郑文忠, 陈伟宏, 王明敏 (2010) 用无机胶粘贴 CFRP 布加固混凝土梁受弯试验研究. *土木工程学报*, **4**, 37-45.
- [18] 徐明, 庞方腾, 陈忠范 (2013) 无机黏结材料粘贴碳纤维加固混凝土梁受弯性能的试验研究. *工业建筑*, **4**, 156-159.
- [19] 张鑫, 李士彬, 杨莅深 (2010) 无机胶粘贴碳纤维布加固混凝土梁受弯性能试验研究. *建筑结构学报*, **S2**, 249-254.
- [20] Täljsten, B. and Blanksvärd, T. (2007) Mineral-based bonding of carbon FRP to strengthen concrete structures. *Journal of Composites for Construction*, **11**, 120-128. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2007\)11:2\(120\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2007)11:2(120))
- [21] 王旻, 覃维祖 (2007) 化学激发胶凝材料用于 CFRP 加固混凝土柱的研究. *施工技术*, **3**, 73-75.
- [22] 郑文忠, 万夫雄, 李时光 (2010) 用无机胶粘贴 CFRP 布加固混凝土板抗火性能试验研究. *建筑结构学报*, **10**, 89-97.
- [23] 张婷婷 (2011) 无机胶粘贴碳纤维布加固钢筋混凝土梁高温性能的试验研究. 硕士论文, 山东建筑大学, 济南.