

Strengthening application of carbon fiber composite

Wu Tang

Zhejiang Huhang Ningbo Expressway Co., Ltd., Hangzhou

Abstract: carbon fiber reinforced polymer (CFRP) is a new type of structural reinforcement technology. Combined with the practice of Shanghai Nanjing expressway maintenance project, the application of CFRP in the reinforcement of concrete structure is introduced.

Key words: carbon fiber; composite material; reinforcement technology; concrete

Received: 2019-08-06; Accepted: 2019-09-10; Published: 2019-09-23

碳纤维复合材料的加固应用

吴 棠

浙江沪杭甬高速股份有限公司，杭州

邮箱: wutang159831351@163.com

摘 要：碳纤维复合材料补投是一种新型的结构加固技术，结合沪宁高速公路维修工程实际，介绍了碳纤维复合材料在混凝土结构加固中的应用。

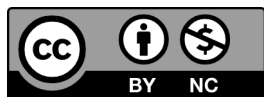
关键词：碳纤维；复合材料；加固技术；混凝土

收稿日期：2019-08-06；录用日期：2019-09-10；发表日期：2019-09-23

Copyright © 2019 by author(s) and SciScan Publishing Limited

This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



1 概述

碳纤维复合材料用于混凝土结构加固补强技术在我国虽然起步较晚，但发展迅速，是一种新型的结构加固技术，应用于结构物一般性病害的修补和加固。碳纤维片材修补混凝土结构技术的工艺原理是利用混凝土的强渗透性和树脂的粘结特性，将抗拉强度极高的碳纤维用环氧树脂预浸成为复合增强片材（单向连续纤维）；用环氧树脂粘结剂沿受拉方向或垂直于裂缝方向粘贴在要补强的结构表面上，形成一个新的复合体，使增强贴片与原有钢筋混凝土共同受力增大结构的抗裂或抗剪能力，提高结构的强度、刚度、抗裂性和延伸性，以达到对结构加固补强的目的。

2002 年以来，江苏宁沪高速公路股份有限公司将该技术应用于沪宁高速公路中小桥一般性病害的加固修复养护工程中，效果明显。本文对该技术的施工实践进行探讨。

沪宁高速公路 HN106K+046 中桥维修工程应用了碳纤维复合材料补强技术。该桥主体结构为 5 跨 ($2 \times 13 \text{ m} + 1 \times 20 \text{ m} + 2 \times 13 \text{ m}$) 简支 PC 空心板梁 (中孔为 T 梁)，

全长 77.44 m，桥墩灌注桩基础。该桥 0# 台的 3#、5#、7#、9#、10# 梁板下各有 1 条纵向裂缝，最大宽度 0.25 mm；0# 台有 2 条裂缝，宽度分别为 0.3 mm、0.5 mm。2004-06-27，对该桥的梁板进行粘贴碳纤维加固，桥台采用灌浆法封缝防渗处理。

2 材料要求

2.1 碳纤维片材材料要求

（1）加固用碳纤维片材应具有质检部门的产品性能检测报告和产品合格证；碳纤维片材和配套树脂类粘结材料要符合相应的物理力学性能要求；对配套的树脂类粘结材料还要求提供耐久性能指标及施工和使用环境要求。

（2）碳纤维片材的性能指标是对单向碳纤维片材的要求，对双向或多向碳纤维片材，可参照采用。

（3）碳纤维布的抗拉强度应按纤维的净截面面积计算，净截面面积取碳纤维布的计算厚度乘以宽度。碳纤维布的计算厚度应取碳纤维布的单位面积质量除以碳纤维密度。

（4）碳纤维片材的主要力学性能指标应满足表 1 的要求。碳纤维片材的主要力学性能指标可参照现行国家标准《定向纤维增强塑料拉伸性能试验方法》（GB 厅 3354-1999）测定。

表 1 碳纤维片材的主要力学性能指标

性能指标	数值
抗拉强度标准值 /MPa	3000
弹性模量 /MPa	$\geq 2.1 \times 10^5$
伸长率 / %	$\geq 1.5\%$

（5）单层碳纤维布的单位面积碳纤维质量不宜低于 150 g/m²，且不宜高于 450 g/m² 在施工质量有可靠保证时，单层碳纤维布的单位面积碳纤维质量可提高到 600 g/m²，建议采用单位面积质量为 200 g/m² 而 或 300 g/m² 而的碳纤维布。

2.2 配套树脂类粘结材料要求

(1) 采用碳纤维片材对混凝土结构加固时, 应采用与碳纤维片材配套的底层树脂、找平材料、浸渍树脂或粘结材脂。

(2) 配套树脂类粘结材料的主要性能指标要满足表 2~ 表 4 的要求。

表 2 底层树脂的性能指标

性能项目	性能指标
正拉粘结强度	$\geq 2.5 \text{ MPa}$, 且不小于被加固混凝土的抗拉强度标准值 f_{tk}

注: f_{tk} 为被加固混凝土抗拉强度标准值。

表 3 找平材料的性能指标

性能项目	性能指标
正拉粘结强度	$\geq 2.5 \text{ MPa}$, 且不小于被加固混凝土的抗拉强度标准值 f_{tk}

表 4 浸渍树脂和粘结材脂的性能指标

性能项目	性能指标
拉伸剪切强度 /MPa	≥ 10
拉伸强度 /MPa	≥ 30
压缩强度 /MPa	≥ 70
正拉粘结强度	$\geq 2.5 \text{ MPa}$, 且不小于被加固混凝土的抗拉强度标准值 f_{tk}
弹性模量 /MPa	≥ 1500
伸长率 / %	≥ 1.5

(3) 配套树脂类粘结材料应按照有关规定进行正拉粘结强度测定。配套树脂类粘结材料可参照《机械工业产品用塑料、涂料、橡胶材料人工气候加速试验方法》(GB 14522-93) 规定的环境条件进行耐久性检验。经 2000 h 加速老化后, 按规定测定的正拉粘结强度不应明显降低。

(4) 如对已加固完的结构表面进行防护处理的, 其表面防护材料应与浸渍树脂或粘结材脂能可靠粘结, 无不良化学反应。

(5) 选用的防火材料及其处理方法, 能使加固后的结构物达到要求的防火等级。

(6) 当被加固的结构处于特殊的环境时, 应根据具体情况选用有效的防护材料, 并试验证明其表面防护材料与浸渍树脂或粘结材脂能可靠粘结。

3 施工工艺

采用碳纤维片材加固混凝土结构的施工关键工艺是粘结材料的配比,由于工序间时间性要求高,不合格产品返工难,因此选择施工队伍时考虑施工经验最重要,应由熟悉该技术施工工艺的专业施工队伍承担,并应有加固方案和施工技术措施。总体上讲,工艺流程可以归纳为:混凝土结构物卸载—混凝土基底处理—涂底层涂料—构件表面残缺面的修补—粘贴碳纤维片—养护—涂装。

(1) 施工准备

CD 施工宜在环境温度为 5℃ 以上的条件下进行,并应符合配套要求的施工使用温度。当环境温度低于 5℃ 时,应采用适用于低温环境的配套树脂或采取升温措施。

①施工时应考虑环境湿度对树脂固化的不利影响,相对湿度不得大于 70%,否则应采取有效防护措施。

②在进行混凝土表面处理和粘贴碳纤维片材前,应按加固设计部位以放线定位。

③树脂配制时,应按产品使用说明中规定的配比称量并置于容器中,用搅拌器搅拌至色泽均匀。在搅拌用容器内及搅拌器上不得有油污和杂质。应根据现场实际环境温度确定树脂的每次拌和量,并按要求严格控制使用时间。

(2) 栓表面处理

①清除被加固构件表面的剥落、疏松、蜂窝、腐蚀等劣化、残缺、破损混凝土,露出混凝土结构层,达到结构密实部位。涂饰、弹性封闭材料等会造成粘接不良,也应予清除。

②对经过剔凿、清理和露筋的构件残缺部分进行修补、复原,并用修复材料将表面修复平整,修复后的段差尽量平顺。

③用砂轮将构件表面凸出部分打磨平整(混凝土构件交接部位、模板的段差保持在 1 mm 以内),除去表层浮浆、油污等杂质,直至完全露出混凝土新面。转角粘贴如践行导角处酮印磨成圆弧状,圆弧半径不小于 30 mm,与两表

面必须相切。

④对裂缝进行灌缝或封闭处理。缝宽小于 0.2 mm 的裂缝,用环氧树脂进行表面涂刷密封;大于 0.2 mm 的裂缝用环氧树脂灌缝。混凝土主体上的小孔由于温度变化等会排出混凝土内部的空气及水分,造成空鼓隆起,所以施工时应尽量用底涂或腻子掩埋小孔。

⑤混凝土表面处理完后,用空气枪或鼓风机将混凝土粉尘完全吹净并保持干燥。

(3) 涂刷底层树脂

①按产品生产厂提供的工艺规定配制底层树脂。先称量主剂,然后加入固化促进剂,搅拌均匀,1 ~ 3 min 后再加入固化剂,搅拌均匀,涂刷。一次调和量应以在可使用时间内用完为准。

②用滚筒刷将底层树脂均匀涂抹于混凝土表面,涂刷时要力求薄而均匀,并不得漏刷或有流淌、气泡。钢筋及凹凸不平等难于涂刷部位需反复多刷几次。

③宜在底层树脂表面指触干燥后,尽快进行下一工序的施工。指触干燥时间因气温不同而不同,一般气温在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 15\text{ }^{\circ}\text{C}$,指触干燥时间在 3 h ~ 1 d。

(4) 找平处理

用环氧腻子对构件表面残缺面的修补是十分重要的一步,要点如下。

心按产品生产厂提供的工艺规定配制环氧腻子找平材料。腻子主剂、固化促进剂、固化剂按规定比例称量准确,装入容器,添加次序同底层涂料施工要求,用搅拌器搅拌均匀。

①用环氧腻子找平材料对混凝土表面凹陷部位填补平整,不应有棱角。

②内角(段差、起拱等)要用环氧腻子填补,使之平顺,修理成为光滑的圆弧,半径不应小于 20 mm。

③腻子涂刮后,表面仍存在的凹凸糙纹,应再用砂纸打磨平整。

④在环氧腻子找平材料表面指触干燥后,尽快进行下一工序的施工。

(5) 粘贴碳纤维片材

①粘贴碳纤维片之前,首先应确认粘贴表面干燥。需要的尺寸裁减碳纤维布。用钢直尺与壁纸刀按规定尺寸切断碳纤维片,每段长度一般以不超过 6 m 为宜。

为防止片材在保管过程损坏,片材的裁切数量应按当天的用量裁切为准。

②按产品生产厂提供的工艺规定配制浸渍树脂,并均匀涂抹于粘贴部位。粘贴树脂的主剂、固化催促剂和固化剂应按规定的比例称量准确,装入容器,添加次序同涂底层涂料,用搅拌器搅拌均匀。一次调和量应以在可使用时间内用完为准。

③将碳纤维布用手轻压贴于需粘贴的位置。采用专用的滚筒(罗拉)顺纤维方向反复滚压,挤出气泡,在碳纤维片和树脂之间尽量不要有空气,使浸渍树脂充分浸透碳纤维布,滚压时要注意不得损伤碳纤维布。

④顺纤维方向的碳纤维布应连续粘贴。当遇到需要搭接时,应保证其搭接长度至少为200 mm,该部位应多涂树脂,且搭接应设在受力较小的地方,碳纤维横向不需要搭接。

⑤多层粘贴时应重复上述步骤,并宜在纤维表面的浸渍树脂指触干燥后尽快进行下一层粘贴;

⑥在最后一层的碳纤维布的表面均匀涂抹浸渍树脂。

(6) 养护及表面防护

心粘贴碳纤维片后,需自然养护1~2 h达到初期固化,应保证固化期间不受外界干扰和碰撞,无任何荷载。

①如缺陷处理的桥梁位于非通道处或人、车来往较少处,可采用与碳纤维片材之间有可靠粘结的浸渍树脂进行表面均匀涂装作防护处理。

②如缺陷处理桥梁位于通道处或有外观要求处时,可在其外采用“风彩”类桥梁漆并按相关要求作涂装防护。

③如加固补强构件需要防火时,可在树脂固化后涂刷耐火涂层。涂装应在树脂初期固化后进行,并应遵守所用涂料的相关标准和施工规定。

(7) 施工安全事项

①碳纤维片材为导电材料,施工碳纤维片材时应远离电气设备和电源,或采取可靠的防护措施。

②施工过程中应避免碳纤维片材弯折。为防止碳纤维受损,在碳纤维片运输、储存、裁切和粘贴过程中,严禁受到弯折。使用较长的片材时,除精心防止弯折外,

对脱泡、渗浸过程要加倍认真操作。归纤维片材配套树脂的原料应密封储存，远离火源，避免阳光直接照射。

③树脂的配置和使用场所应保持通风良好。

④固化剂中含有有机过氧化物，应避免使用铁、铜、黄铜等金属制品，应使用玻璃、铝、不锈钢等材料的容器。

⑤固化剂不得与胺类、强酸、强碱、还原性物质接触。

⑥现场施工人员应采取相应的劳动保护措施。

(8) 其它注意事项

①心树脂、固化剂、固化促进剂的计量必须使用计量器，计量器精度为 $\pm 1\text{ g}$ 。混合的顺序是：先计量树脂，然后添加固化促进剂搅拌 $1 \sim 3\text{ min}$ ，然后添加固化剂搅拌 $1 \sim 3\text{ min}$ 。严禁同时添加固化剂和固化促进剂。

②固化剂（及固化促进剂）的添加量应充分考虑施工温度及混凝土主体温度后决定。冬季的混凝土主体温度有时比作业场所的温度低，这时固化时间会变长。主体温度低时，如果增加固化剂、固化促进剂，会使树脂的可使用时间变得非常短。

③标准使用量的胶凝化时间设定为：底涂， $30 \sim 40\text{ min}$ ；腻子， $40 \sim 50\text{ min}$ ；浸渗粘接树脂， $50 \sim 60\text{ min}$ 。胶凝化时间一超过，就会发生急剧的固化，不能再使用，所以可使用时间应比凝化时间短 10 min 。

④树脂的混合量应在可使用时间内用完。特别是在进行浸渗粘接树脂的施工时，应考虑浸渗时间再决定混合量。

⑤改性环氧树脂由于空气中的氧化作用表面的固化易受到抑制，有发粘的感觉，在最终层的浸渗粘接树脂（上涂、或下涂）中添加蜡剂，以提高表面的固化性。

⑥底涂和腻子的固化剂，与浸渗粘接树脂的固化剂不同，使用时应分清用途，不得用错。

⑦由于降雨或结露留下的水分会影响底涂及浸渗粘接树脂的粘结，如果是雨天或结露时，应停止施工。

⑧固化的树脂如果沾上水分，会影响下面一层树脂的粘接性，所以要用棉

纱擦干净表面的水分。如果发生浸水,应进行止水、引水处理。

⑨底涂、腻子、渗浸粘接树脂绝对不得使用稀料等有机溶剂进行稀释。用稀料等溶剂进行稀释后,固化树脂的物理性能会降低,不能获得预定的强度。

⑩主剂、固化剂混合后,应严格遵守可使用时间,如果出现胶凝化的前兆应立即停止使用。

⑪及时全面记录施工时的配比、气温、主体温度、各工序时间段,以寻找、熟悉规律,摸索各种环境条件下的最佳施工效果。

3 检验及验收

应确认碳纤维片材和配套树脂类粘结材料的产品合格证、产品质量出厂检验报告,各项性能指标应符合前述各条款的要求。选用的碳纤维片材和配套树脂在运至工地后,应按要求对同批次材料做一组(三个为一组)抽检,不满足前述要求的,不得使用,非同批次材料需另做抽检。采用碳纤维片材和配套树脂类粘结材料对混凝土结构进行加固时,应严格按各条款规定进行各工序隐蔽工程的检验及验收,现场资料齐全。如施工质量不满足相应的要求,应立即采取补救措施或返工。碳纤维片材的实际粘贴面积不应少于设计面积,位置偏差不应大于10 mm。施工结束后的现场验收以评定纤维布与混凝土之间的粘结质量为主。碳纤维片材与混凝土之间的粘结质量,可取小锤轻轻敲击或用手压碳纤维片材表面的方法检查,或用专用钢球在碳纤维表

面来回滑动,以回声来判断粘结效果。总有效实贴面积不应低于95%。当碳纤维布的空鼓面积不大于10 000 mm²时,可采取针管注胶的方法进行修补。当空鼓面积大于10 000 mm²时,宜将空鼓部位的碳纤维片材切除,重新搭接贴上等量的碳纤维片材,搭接长度不应小于100 mm。必要时,可对施工质量进行现场抽样检验。现场检验应在已完成碳纤维片材加固的结构表面上进行。按实际粘贴碳纤维片材的加固结构表面面积计,500 m²以下工程取1组(1至3个为一组,可视情况取用)试样;500~1 000 m²工程取2组试样;1 000 m²以上工程每1 000 m²取2组试样。试样应由检验人员随机抽取,试样间距不得小于500 mm。现场试样制备应按下列步骤进行。

- (1) 表面处理: 被测部位的加固表面应清除污渍并保持干燥。
 - (2) 切割预切缝: 从加固表面向混凝土基体内部切割预切缝, 切入混凝土深度 2 ~ 3 mm, 宽度 1 ~ 2 mm。预切缝形状为直径 4 mm 的圆形。
 - (3) 粘贴钢标准块: 采用取样粘结剂粘贴直径为 40 mm 的圆形钢标准块。取样粘结剂的正拉粘结强度应大于碳纤维片材粘贴树脂的正拉粘结强度。钢标准块粘贴后应及时固定。
 - (4) 按照粘结强度检测仪生产厂提供的使用说明书, 连接钢标准块, 以 1 500 ~ 2 000 N/min 匀速加载, 记录破坏时的荷载值, 并观察破坏形态。
- 碳纤维片粘贴的质量检验要符合以下要求:
- (1) 下涂和上涂渗入碳纤维束良好。(2) 碳纤维片粘结严实。(3) 对千直径在 10 ~ 30 mm 的空鼓, 每平方米少于 10 个可认为合格; 若每平方米在 10 个以上, 则认为不合格, 需进行补修。对于直径在 30 mm 以上的空鼓, 只要出现, 即认为不合格, 需进行补修。
 - (4) 顺纤维方向搭接长度不小于 20 cm, 各层之间的搭接部位不得位于同一条直线上, 层间必须错开至少 50 cm。
 - (5) 碳纤维片材规格, 贴片位置、长度、宽度、纤维方向、层数符合规定。
 - (6) 养护严格遵守自然养护的时间要求。

4 结语

碳纤维复合材料用于混凝土加固, 在我国虽然起步较晚, 但发展迅速, 是一种新型实用的结构加固技术, 实践证明采用此技术对混凝土结构物的病害进行修补, 可以提高桥梁的承载能力和延长其使用寿命, 但碳纤维加固维修也有不足之处, 如耐火性不强、装饰效果不理想等, 这就需要根据不同实际情况选用合适的加固工艺。

参考文献

- [1] 贺虎. 碳纤维复合材料钻削力与孔质量研究 [D]. 南京航空航天大学, 2011.

-
- [2] 张建国, 岳金, 宋春生, et al. 碳纤维复合材料螺旋桨铺层角度研究 [J]. 武汉理工大学学报 (信息与管理工程版), 2014 (2): 207-210.
- [3] 郑传祥, 窦丹阳, 林娇, et al. 碳纤维复合材料防撞梁的设计与分析 [J]. 机械制造, 2019 (6).