

纤维增强复合材料加固变电站户外构支架基本力学性能和长期受力性能研究

项明荣

(广东天联电力设计有限公司, 广州 510633)

摘要: 变电站户外构支架的材质在早期采用的是钢筋混凝土结构, 由于其结构特性受当年技术水平影响, 且人为施工质量受限, 导致钢筋混凝土经多年使用后, 在构支架表层处出现开裂和剥落的腐蚀现象, 严重影响变电站的正常操作和安全运行。近年来, 纤维增强复合材料(简称 FRP)在变电站构支架加固中得应用越来越多。本文针对目前关于湿热条件下 FRP 加固构支架基本力学性能和长期受力性能研究较少的问题, 对其进行了专门研究并提出综合治理方案。

关键词: 增强纤维复合材料; 变电站构支架; 耐久性能; 湿热环境; 综合治理

中图分类号: TU761

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)S1-0088-05

Study on Basic Ories and Longtime Behavior of Substation Concrete Framework Structures Strengthened by Fiber Reinforced Polymers

XIANG Mingrong

(Guangdong Tianlian Electric Engineering Design Co., Ltd., Guangzhou 510633, China)

Abstract: Early transformer substation outdoor trusses are all structured in reinforced concrete. Du to the structure feature of the concrete, technical limit and construction quality in the old days, with years' operation, corosion of craze and peeling wildly appears on the surface concrete of these trusses which seriously affects transformer substation's operation and safety. Lately years, more substation framework are rein forced by FRP. In this Paper, a range of tests about the durability of FRP strengthening structures with wet-condition have been accomplished, and a comprehensive control strategy have been obtained.

Key words: fiber reinforced plastic; substation framework; durability; wet-thermal condition; comprehensive control

虽然我国早期变电站户外构支架结构已开始采用钢筋混凝土和预应力混凝土环形杆结构, 但受当时材料研发水平和施工条件等影响, 目前大部分该种结构在处于老龄期的同时, 均已出现钢筋腐蚀外露、连接埋件锈蚀脱落、不同程度开裂和剥落等现象。

针对这些问题, 科技工作者与工程技术人员通过技术可行性论证, 发现采用新的高性能外贴材料, 如纤维增强塑料(FRP)等^[1], 可加固钢筋混凝土和梁的抗弯剪性能, 从而使柱有更优良的抗震性

能与延性加固性能^[2]。此外, 在经济可行性方面, 该改造工程与新建工程相比, 可将投资成本显著节约近 40%, 工期缩短约 50%, 成本回收速率快 3-4 倍。因此, 采用新高性能材料对混凝土结构的改造技术, 有着其显著的工程应用优势。

1 变电站构支架老化形式

根据对相关老旧变电站现场情况考察、分析; 可将变电站构支架的主要破坏形态和形成破损的原因归纳如下:

1) 构架混凝土存在不同程度的炭化、老化, 一般混凝土炭化深度已超过 10 mm, 各部分混凝土强度很不均匀, 同一排架或同一构件不同部位的混凝土强度也不均匀, 差值较大。

2) 许多钢筋混凝土构架柱、混凝土构架横梁均

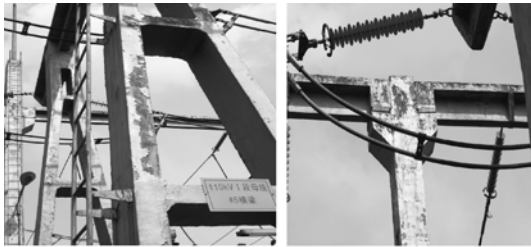
收稿日期: 2015-12-01

作者简介: 项明荣(1965), 男, 江西峡江人, 高级工程师, 学士, 主要从事输变电土建结构研究工作(e-mail) xiangmingrong@gedi.com.cn。

存在纵向裂缝, 裂缝宽: 0.3 ~ 10 mm 不等; 裂缝长: 1 ~ 2 m 至通长。

3) 构架混凝土空鼓、鼓包、剥落、掉块, 在构架的关键部位造成严重破坏。造成这种严重破坏的主要原因是: 混凝土碳化、保护层破坏后钢筋锈蚀、膨胀所致。

4) 构架上预埋件锈蚀, 松脱, 给设备安全带来一定隐患。



(a) 构架柱表面混凝土剥落 (b) 构架梁、柱节点剥落
图 1 构架柱表面混凝土、构架梁和柱节点剥落状况

Fig. 1 Spalling of Surface Concrete, Frame Beam and Column

2 目前国内构支架加固耐久性研究进展

我国目前缺乏建构筑物质量和耐久性标准评估规范和计算方法, 也没有专业的检测设备匹配。为了克服这些实际难题, 部分研究者^[3]通过工程实践的信息反馈, 将混凝土构支架结构特点用了一条经验算式进行计算, 如下式(1)所示:

$$Y_{\alpha} = T \times \frac{\left[\frac{\sum f_x - \sum f_{sk}}{\sum f_x} \right]}{K_0 - Y_0} \quad (1)$$

实施过程中, 该公式须满足 3 个条件: 第一, 基准期的判定。以现行设计规范为基础, 结合混凝土强度、等级等原始数据综合判定。第二, 结构重要性的选择。结构重要性调整为准安全系数的 1.2 ~ 1.3 倍; 第三, 特殊情况的评估。当构支架受损坏最严重时, 要进行评估。因此, 该公式的实质是对混凝土构支架加固耐久性进行定性分析。本文以此为基础, 将对 FRP 加固构支架薄壁结构的长期受力性能/耐久性能和 FRP 与混凝土之间粘结性能进行深入专题研究。

3 纤维增强复合材料与混凝土的粘结性能

采用 FRP 加固已有结构最常见的方法是在结构表面粘贴 FRP 片材/板材。因此, 影响结构加固

效果的重要因素是 FRP 与混凝土结构粘结面的粘结强度。

FRP 与混凝土的粘结强度主要分为剪切粘结强度、正拉粘结强度和拉剪粘结强度。受粘结强度标准缺乏的限制, 粘结强度试验方法也各不相同。吴智深等^[4]通过试验结果分析, 并进行理论公式推导, 认为在混凝土梁中弯曲裂缝附近处, FRP 应力传递机理与剪切试验基本一致。即粘结面与 FRP/混凝土间粘结应力在用 FRP 抗剪加固梁时相平行。因此其也属于剪切粘结范畴。

粘结破坏分三种典型破坏: (1) 纤维片材与混凝土之间的剥离破坏; (2) 混凝土剪切破坏; (3) 混凝土大面积剥落。在纤维片材与混凝土的粘结试验中, 当纤维片材宽为 20 mm 时, 纤维片材与混凝土剥离破坏现象频率较高; 当纤维片材宽为 50 mm 时, 混凝土剪切破坏现象频率较高, 当纤维片材宽为 80 mm 时, 混凝土剪切破坏与大面积剥落现象频率较高。这说明, 纤维片材与混凝土的粘结性能受二者宽度比的影响较大。

根据前人的研发成果, 结合多个变电站的现场实验, 本文提出新的粘结强度计算公式, 如下所示:

$$P_u = K \cdot \sqrt{f_c} \cdot k_f \cdot k_b \quad (2)$$

式中: P_u 为粘结强度, 单位 N/mm; K 为试验常数; f_c 为混凝土抗压强度; k_f 为与纤维片材类型有关的系数, 碳纤维片材取 1, 玻璃纤维片材取 0.8; k_b 为与纤维片材和混凝土宽度比系数, 取 $k_b = 2.00 \sim 0.75 b_p/b_c$, b_p 为混凝土宽度, b_c 为 FRP 片材的宽度, mm。

根据上述公式可以推导得出:

1) 粘结长度影响。极限粘结强度与粘结长度呈正相关。但当超过有效粘结长度后, 极限粘结强度不再受其影响。

2) 混凝土基层强度影响。极限粘结强度受混凝土基层强度的影响。即极限粘结强度正比于混凝土抗压强度的平方根。

3) FRP 的宽度影响。FRP 的宽度和极限粘结力呈正相关性。

4) FRP 和混凝土的宽度比影响。极限粘结强度受 FRP 和混凝土的宽度比影响。宽度比越大, 极限粘结强度越低。

5) 纤维片材种类影响。极限粘结强度受纤维片

材种类影响。对比纤维增强复合材料极限粘结强度性能,玻璃纤维片材与混凝土的极限粘结强度低于碳纤维片材与混凝土的极限粘结强度。

4 纤维增强复合材料(FRP)的耐久性能研究

FRP材料的优点为适合于已有结构的补强加固。具有质量轻、强度高、易施工等特点。FRP材料的缺点为实际应用时间短,其长期受力性能有待证实。因此其耐久性研究从以下三方面着手^[5]:

1) 水环境对纤维增强复合材料性能的影响。

玻璃纤维水侵蚀机理尚不完善,目前主流观点观点为,水中羟基与玻璃纤维Si-O键作用,影响Si-O键的稳定性,导致玻璃纤维强度下降。本次纤维复合材料浸水试验将模拟变电站施工实际环境,先将玻璃纤维增强复合材料预涂环氧树脂(其主要作用是形成整体纤维丝,提高其强度和稳定性),在将玻璃纤维复合材料浸水进行试验。试验结果显示,经浸水后,玻璃纤维复合材料强度下降。究其原因,一方面是因为水对玻璃纤维具有一定的侵蚀作用,另一方面,预涂胶性能在水环境下引起退化。

2) 纤维材料应力—应变关系通过湿热老化试验,呈线性相关;碳纤维增强复合材料的力学性能基本没有受湿热老化影响。

3) 碱化试验的结果表明,纤维材料应力—应变关系呈线性相关。在强酸强碱的环境下,玻璃纤维增强复合材料力学性能受到抑制影响,降低该侵蚀性能的途径可采用预涂环氧树脂。

5 纤维增强复合材料加固混凝土结构的耐久性能

南方地区采用FRP加固构支架时,易受到湿热环境的影响。已有的报道指出,受湿度变化影响,FRP材料性能(特别是粘结剂环氧树脂)会出现显著变化。日本、美国和欧洲等国外研究表明,该材料使用仅有20多年,其长期的加固性能还未得到有效证实。

在湿热环境下,玻璃纤维片材加固构架混凝土梁抗剪能力受到以下几个方面的影响:

1) 玻璃纤维片材自身力学性能影响。主要体现在,玻璃纤维片材在加固梁的靠近支座处,会发生

断裂。相比于抗拉强度下降,加固作用影响受弹性模量下降的影响更显著。

2) 玻璃纤维片材与混凝土的粘结强度影响。主要表现在,在玻璃纤维片材与混凝土发生粘结破坏的区域,粘结强度下降,会引起玻璃纤维片材在梁加载点处加固作用的降低,当降低到一定极限时,会破坏支座处玻璃纤维片材与混凝土之间的粘结性能,更大程度上破坏加固效果。

6 纤维增强复合材料的徐变性能初步研究

根据材料力学理论,当施加应力不超过限值时,徐变断裂不会发生。目前,采用FRP碳纤维片材补强加固已有混凝土结构后,经过较长时间,混凝土结构的自身徐变已完成。以粘贴碳纤维片材抗弯加固构架梁结构为例,在粘贴初期,通过荷载作用,受拉钢筋和碳纤维片材上经受弯构件协调变形,产生了一定的拉应力(忽略混凝土的抗拉强度)。当荷载不变时,由于碳纤维片材的徐变性能,随着时间增加,碳纤维片材应变性能会引起受弯钢筋与碳纤维片材上的应力重分布,导致受弯钢筋应力增加,碳纤维片材上应力减少,构件挠度最终增加。但碳纤维片材传递应力的增加量与其自身徐变产生的应力量级相差甚远,可忽略不计。

7 加固处理方法

根据上述几节FRP加固构支架薄壁结构的耐久性能和长期受力性能的研究,笔者对变电站构支架加固提出以下综合治理的方案,确保加固结构的耐久性。

7.1 构架梁承载力不足的加固

当构架抗弯截面、抗剪承载力不足时,采用碳纤维布加固梁(具体根据整体验算结果来确定)。

7.2 构架柱承载力不足的加固

对轴心受压承载力不足的人字形构架柱,采用环向围束法粘贴碳纤维布的方法进行加固;对抗弯截面承载力和抗剪承载力不足的人字形构架柱,采用粘贴纵向碳纤维布与横向环型箍的方法进行加固(具体根据整体验算结果来确定)。

7.3 构架加固补强防护设计

根据本文确定的FRP构支架加固、补强、防护的耐久性研究,通过多方案的分析比较。在加固设计中,拟采用:

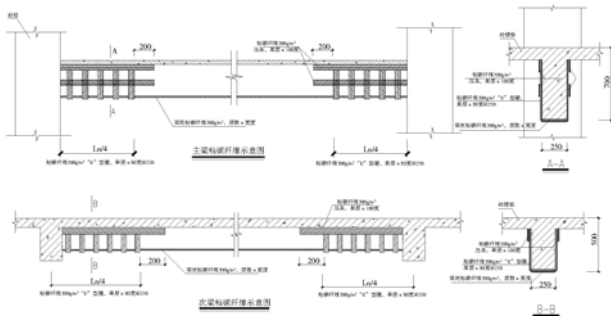


图3 主、次梁粘碳纤维示意图

Fig. 3 Schematic Diagram of the Main and Secondary Beams

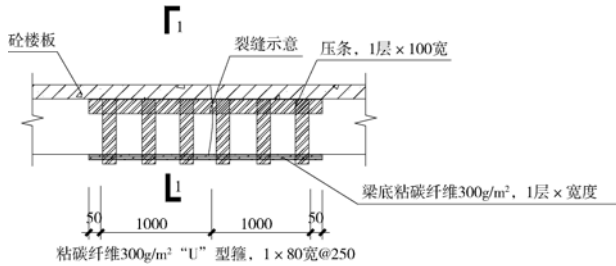


图4 中间梁粘碳纤维大样图

Fig. 4 The Middle Beam Stick Carbon Fiber Drawing

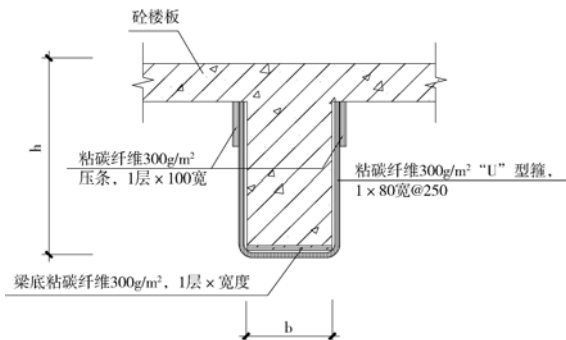


图5 1-1剖面图

Fig. 5 1-1 Profile

1) 高渗防水剂、高分子裂缝灌浆料和高强微膨修复料等对不同裂缝宽度的裂缝进行处理, 消除裂缝对构架材料的切割破坏。

2) 新老砼界面剂、高强微膨修补材料、聚合物砂浆修补材料(并配合碳纤维)等对剥落、掉块、鼓包、空鼓、及局部疏松区等进行修补、修复加固。

3) 碳纤维对钢筋锈蚀、混凝土纵裂横裂、混凝土疏松区、结构需要提高强度的部位等进行加固补强。

4) 高分子织物膜、混凝土保护胶等技术对构支架进行整体加固、防护。

5) 对于荷载增加的T型梁分别在两翼缘的侧面和T型梁底部粘贴碳纤维, 环向按规范要求粘贴碳纤维箍条和压条, 或采用在挂环处用钢板加固的方法。

7.4 结构开裂加固

1) 对于构架柱、梁及支架等各构件上产生的缝宽大于0.3 mm纵向和横向尚未闭合、尚未堵塞的裂纹或裂缝, 设计采用高分子裂缝灌浆材料对各裂缝进行有压灌浆, 灌浆压力一般为: 0.3 ~ 0.6 MPa, 沿裂缝每隔: 30 ~ 50 cm 粘贴一个灌浆嘴, 灌浆嘴之间的裂缝表面采用高强聚合物砂浆封缝。

2) 对于构架柱、梁及支架等各构件上产生的缝宽小于0.3 mm纵向和横向裂纹或裂缝或已闭合和堵塞的裂纹, 设计采用高渗防水剂涂刷裂缝发育区, 使之渗透到混凝土表面内部45 cm, 提高混凝土表层强度约30%, 同时粘接、充填、封堵混凝土中各微细裂纹、细小空洞, 消除其对结构的切割作用、提高密实性和内部的微细缺陷;

3) 对于构架柱、梁及支架等各构件上产生的缝宽大于5~8 mm的纵向和横向尚未闭合、尚未堵塞的裂纹或裂缝, 设计采用高强微膨修补材料对宽裂缝进行镶固; 通过这些措施消除架构上各种宽度裂缝对结构的切割作用, 恢复结构的连续性和整体性。

7.5 结构构件上鼓包、酥松、剥落、掉块等破损处加固

对于构架柱、梁及支架等构件上的鼓包、空鼓、酥松、剥落、掉块等破损处, 在采取必要的措施确保结构施工期安全的前提下, 设计要求先剔除现有的空鼓、鼓包、酥松、剥落、掉块等破损处的低标号混凝土、原修补材料、清理基面; 涂刷新老混凝土界面剂, 对于表面积小于500 cm²的破损处, 采用高强聚合物砂浆修补破损处; 对于表面积大于500 cm²的破损处, 采用高强微膨材料修补破损处, 外侧再采用结构加固措施(如采用碳纤维加固)约束, 促使修补体内部应力能得以调整)。

7.6 结构碳纤维补强加固

对于支架及构架柱、梁等的各主筋、箍筋外露、锈蚀区; 支架及构架柱、横梁开裂处(存在一条缝长超过0.6 m; 或缝长虽小于0.6 m, 但条数超过两条的情况); 支架及构架柱、梁开裂破损面大于500 cm²的地方, 均采用碳纤维加固补强。

1) 支架及构架柱、梁各主筋外露处: 在混凝土各开裂破损处修复后, 按每三根(少于三根的按三根计)锈蚀主钢筋粘贴一道宽: 10 cm、长: 两端各超出修补区30~50 cm、顺主筋方向的碳纤维的原

则进行碳纤维加固,纵向碳纤维两端各粘贴一道碳纤维环压住纵向碳纤维的两端(碳纤维环的搭接长度为:10~15 cm);如果混凝土各开裂破损处箍筋严重锈蚀,在修复后沿箍筋锈蚀区环向粘贴一道宽10 cm的碳纤维环。以补充混凝土中环向的含钢量不足。

2) 支架及构架柱、梁开裂处:柱开裂处的各缝端,各粘贴一道碳纤维环,粘贴方式及碳纤维规格与上述碳纤维环相同,盖住缝端;顺裂缝纵向粘贴同样规格的碳纤维条,以补充支架及构架柱、横梁开裂区的强度的不足。

3) 混凝土酥松区、低标号混凝土区,采用宽:10 cm、中心间距:400 mm的碳纤维环捆绑粘贴加固,碳纤维环的搭接长度为:10~15 cm;

4) 支架及构架柱、梁等破损面大于500 cm²的地方:柱、梁的破损处在修补完后,采用同规格的碳纤维进行包裹(捆绑),加强各破损处。

8 结论

本文针对目前关于FRP加固构支架基本力学性能和长期受力性能研究较少的特点,对其进行了专

门研究并提出相应的综合加固方案。目前该方案已在广东电网几个变电站得以实施,加固近3年后,加固效果良好,充分证明了研究结论的可靠性和加固方案的可行性。接下来,笔者将着重研究FRP加固结构在不同环境下的耐久性能,使其适用区域更为广泛。

参考文献:

- [1] KACHLAEVA D, MCCURRY D. Behavior of Full-scale Reinforced Concrete Beam Stress Fitted for Shear and Flexural with FRP Laminates, Composites [J]. Engineering, 2000 (31): 445-452.
- [2] 岳清瑞, 我国碳纤维增强塑料(CFRP)加固修复土木建筑结构技术研究应用现状与展望 [C]. 中国首届纤维增强塑料(FRP)混凝土结构学术交流会, 2000.
- [3] 邹崇献, 变电站户外构架腐蚀机理研究及防腐补强措施 [J]. 工业建筑, 2012, 19(3): 78-80.
- [4] 吴智深, FRP复合材料在基础工程设施的增强和加固方面的现状和发展 [C]. 中国首届纤维增强塑料(FRP)混凝土结构学术交流会, 2000.
- [5] 任慧韬, 纤维增强复合材料加固混凝土结构基本力学性能和长期受力性能研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2003.

(责任编辑 郑文棠)

(上接第37页 Continued from Page 37)

- [2] LINDENMEYER D, DOMMEL H W, MOSHREF A, et al. A Framework for Black Start and Power System Restoration [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 12(4): 234-251.
- [3] 汪长明, 闫贺群, 许鹏. 华北电网黑启动试验 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24(22): 5-15.
WANG Changming, YAN Hequn, XU Peng. The black Start-up Experiment of North China Power Grid [J]. Automation of Electric Power System, 2000, 24(22): 5-15.
- [4] Lindenmeyer D, DOMMEL H W, ADIBI M M, Power System Restoration a Bibliographical Survey [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2001(23): 219-227.
- [5] ADIBI M M, FINK L H. Power System Restoration Planning [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(1): 22-28.
- [6] Islam S. Nurul Chowdhry, A Case-based Windows Graphic Package for the Education and Training of System Restoration [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16(2): 67-72.
- [7] FOUNTAS N A, HATZIARGYRIOU N D, Organogiannis C, et al. Interactive Long-term Simulation For Power System Restoration Planning [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 12(1): 87-92.
- [8] 黄艳燕, 张颖, 施围. 不同额定电压等级避雷器对操作过电压的影响 [J]. 高压电器, 2003, 39(4): 4-10.
HUANG Yanyan, ZHANG Ying, SHI Wei. Influence of Different Rated Voltage MOAs on Switching Surges [J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(4): 4-10.
- [9] 黄绍平, 李永坚, 赵毅军. 基于MATLAB的MOA过电压保护性能仿真 [J]. 高电压技术, 2003, 29(12): 15-16, 19.
HUANG Shaoping, LI Yongjian, ZHAO Yijun. The Simulating Study on Overvoltage Protection Capability of Metal Oxide Arrester Based on MATLAB [J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(12): 15-16, 19.
- [10] 杨钢, 张艳霞, 陈超英. 电力系统过电压计算及避雷器的数字仿真研究 [J]. 高电压技术, 2001, 27(3): 64-66.
YANG gang, ZHANG Yanxia, CHEN Chaoying. Power System Transient Overvoltage Calculation and Study of Arrester's Digital Simulation [J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(3): 64-66.
- [11] 黄家裕, 陈礼义, 孙德昌. 电力系统数字仿真 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
HUANG Jiayu, CHEN Liyi, SUN Dechang. Power System Digital Simulation [M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1995.

(责任编辑 林希平)