

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2021.01.022

碳纤维复合材料补强输电铁塔腐蚀受损地脚螺栓的试验研究

马君鹏¹,王永强²,池永斌³,岳贤强¹

(1. 江苏方天电力技术有限公司,江苏 南京 211102; 2. 国网江苏省电力有限公司,江苏 南京 210008;
3. 武汉中科创新技术股份有限公司,湖北 武汉 430000)

摘要:为实现输电铁塔腐蚀受损地脚螺栓的补强,采用碳纤维管及碳纤维树脂对地脚螺栓模拟试样进行修复,并对试样进行拉伸试验,获得应力-应变曲线和断裂特征,从而确定了所需碳纤维管尺寸及需灌注的碳纤维树脂厚度。试验结果表明:试样均断裂在母材部分,说明碳纤维复合材料具有良好的补强效果;碳纤维树脂厚度在3 mm以上就能取得良好效果。根据试验结果提出了地脚螺栓补强用碳纤维管主要参数选用的一般原则。

关键词:碳纤维;碳纤维树脂;地脚螺栓;补强;拉伸试验

中图分类号:TB302.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2021)01-0085-04

Experimental Study on Reinforcement of Corrosion Damaged Anchor Bolts of Transmission Line Towers with Fiber Reinforced Polymer

MA Junpeng¹, WANG Yongqiang², CHI Yongbin³, YUE Xianqiang¹

(1. Jiangsu Frontier Electric Power Technology Co., LTD., Nanjing 211102, China;
2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210008, China;
3. Wuhan Zhongke Innovation Technology Co., Ltd., Wuhan 430000, China)

Abstract: In order to realize the reinforcement of corrosion damaged anchor transmission towers, carbon fiber tube and carbon fiber resin were used to repair the simulated sample of anchor bolts, and the tensile test was carried out on the samples to obtain the stress-strain curves and fracture characteristics, by which the required size of carbon fiber pipes and the thickness of carbon fiber resin was determined. All the samples were broken in the base metal, showing that the carbon fiber composite has good reinforcement effect. The test results prove that the thickness of carbon fiber resin should be more than 3 mm. The general principle of size selection of carbon fiber tubes for anchor bolts reinforcement is also proposed.

Keywords: carbon fibre; carbon fiber resin; anchor bolt; reinforcement; tensile test

0 引言

高压输电线路在服役过程中长期暴露在各种腐蚀环境下,尤其是穿越盐碱地和地处海洋气候的输电线路,其杆塔的地脚螺栓在腐蚀介质长期侵蚀作用下产生腐蚀损伤,造成有效受力截面减小,不能满足线路运行强度要求。严重时,地脚螺栓发生断裂,造成倒塔事故,严重危害高压输电线路和电网安全^[1-2]。因此,需要定期对运行年限较长或地处重腐蚀环境的输电线路杆塔地脚螺栓进行无损检测,评估其腐蚀受损程度和耐受应力安全状态,对受损超标地脚螺栓进行损伤补强。

地脚螺栓损伤补强的方法有多种,主要有金属补强和碳纤维复合材料(fiber reinforced polymer, FRP)补强两大类。金属补强通过焊接型钢或螺栓连接实现,存在施工困难、施工周期长、抗腐蚀性差、耐久性差、须改变结构物形状等问题。补强后还会存在焊接缺陷、残余应力和结构应

力等问题,影响设备安全使用,且运行中还会产生新的腐蚀损伤。碳纤维复合材料补强技术充分利用了碳纤维的比强度高、比模量高、耐腐蚀性好、施工方便等优势,克服了金属补强方法的诸多缺点,能够获得良好的补强效果,在钢结构加固修复中得到了广泛的应用^[3-5]。

对于棒型构件而言,采取碳纤维复合材料方法进行补强,其方法相对简单,在损伤部位直接粘贴一定厚度的碳纤维材料即可。碳纤维复合材料补强形式主要有:1)在损伤部位粘贴两片半圆弧型碳纤维材料构成一个圆筒。这种形式应用较多,效果较好;2)在损伤部位缠绕碳纤维布然后浸胶^[6]。这种补强形式效果最好,但现场施工困难、不易实施;3)在损伤部位安装一个橡胶套筒,在套筒内灌注碳纤维树脂胶泥。这种补强形式效果能满足对构件金属损伤的补强,现场施工方便、快捷、特别适用于异形部位的补强,是FRP补地脚螺栓很有效的方法,近年来引起广泛关注和研究^[7]。

高压输电铁塔地脚螺栓属于棒型构件,完全适合利用

基金项目:国网江苏省电子有限公司科技资助项目(J2018012)

第一作者简介:马君鹏(1979—),男,吉林吉林人,教授级高工,本科,研究方向为无损检测。

碳纤维复合材料补强技术进行补强修复。目前,国内外尚未见具体应用案例,因此应从上述3种补强形式中优选一种最适合于地脚螺栓现场补强实施的补强形式。考虑地脚螺栓修复补强时的现场施工空间限制和操作难易程度,采用上述第一种粘贴两片半圆弧型碳纤维材料的补强形式是最优方法。这种方法受现场施工影响小,且碳纤维套筒耐腐蚀,可以保护碳纤维树脂胶泥增强体免受腐蚀介质的侵蚀,延缓其老化进程,提高其耐久性。

本文针对输电线路地脚螺栓碳纤维复合材料补强方法和效果进行研究。首先根据地脚螺栓的直径和受损部位的形状和尺寸确定套管的长度和直径,进而确定碳纤维树脂胶泥增强体的尺寸;然后对补强后地脚螺栓进行拉伸试验,获得其力学性能的相关数据,验证补强效果;同时通过观察碳纤维树脂胶泥增强体在受力过程中的变化,确定补强所需碳纤维管长度和灌注碳纤维树脂胶泥厚度等关键参数的阈值。

1 补强材料及试验

1.1 补强材料

本次补强试验选用规格为M20×550 mm、材质为Q235的地脚螺栓加工缺陷模拟试样。采用目前工程中常用的3种规格碳纤维管,分别为 $\phi 24\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 、 $\phi 26\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 、 $\phi 28\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ 。补强碳纤维选用T300丝材,补强黏结树脂选用专用纤维黏结剂。各项材料的力学性能指标如表1~表4所示。

选用的专用纤维黏结剂具有黏度低、浸润性好、固化后有较高的强度和韧性等优点,能够和碳纤维协同工作提升补强效果,被广泛应用于结构补强加固中。

表1 Q235地脚螺栓的力学性能参数

直径/ mm	弹性模量 E / (10^5 MPa)	屈服强度 σ_s / MPa	极限强度 σ_b / MPa	屈服应变 $\mu\epsilon$	延伸 率/%
20	1.892	285	435	2 567	35.6

表2 碳纤维管力学性能

材料	拉伸强度/ MPa	弹性模量/ (10^5 MPa)	延伸率/%
T300 复合管	4 230	2.33	1.8

表3 T300碳纤维丝力学性能

拉伸强度/ MPa	弹性模量/ (10^5 MPa)	延伸率/ %	密度/ (g/cm^3)	纤维直径/ μm	纤维长度/ mm
3 800	2.38	1.6	1.78	7	50

表4 纤维黏结剂性能指标

材料	黏度/ ($\text{MPa}\cdot\text{s}$)	拉伸强度/ MPa	拉伸剪切 强度/MPa	弹性模量/ MPa	延伸率/ %
黏结剂	$\leq 4\ 000$	33	21	2 336	1.5

1.2 试样设计

1) 缺陷设计

地脚螺栓的损伤主要是腐蚀造成的表面蚀坑或均匀减薄。其中,由于蚀坑存在显著的应力集中,危险性更大。因此在地脚螺栓模拟试样上加工模拟蚀坑缺陷,缺陷深度按直径腐蚀缺失20%确定,试样直径为20 mm,缺陷深度对应为4 mm,长度设计为10 mm。

2) 碳纤维补强体的尺寸设计与选取

碳纤维补强体主要由碳纤维管和碳纤维树脂胶泥增强体两部分组成。其中碳纤维管的管径和厚度可按照安全性和经济性原则在常用规格中选取。碳纤维树脂胶泥增强体的厚度由碳纤维管的尺寸确定,长度与碳纤维管一致。总体来看,影响碳纤维补强体补强效果的主要参数为碳纤维补强体的长度和碳纤维树脂胶泥增强体的厚度。

碳纤维补强体长度的选取一是要考虑缺陷尺寸,二是要考虑缺陷的影响范围。根据圣维南原理,对于棒型工件而言,缺陷的影响范围相当于其直径的1~1.5倍,考虑安全裕量按2倍计算,因此碳纤维补强体长度为缺陷长度与4倍螺栓直径长度之和。按照以上原则,本实验T300碳纤维复合管的长度选为90 mm,如图1所示。

碳纤维树脂胶泥增强体的厚度为试样外径和T300碳纤维复合管的内径之差。因此,选择不同内径的碳纤维复合管,就可获得不同厚度的碳纤维树脂胶泥增强体。为了比较并优化确定碳纤维树脂胶泥增强体的最佳尺寸,本试验T300碳纤维复合管选取3种尺寸,分别为 $\phi 24\text{ mm} \times 90\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 、 $\phi 26\text{ mm} \times 90\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 、 $\phi 28\text{ mm} \times 90\text{ mm} \times 8\text{ mm}$,对应的碳纤维树脂胶泥增强体尺寸为 $90\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 、 $90\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 、 $90\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 。将所选补强碳纤维管切割成两个半圆型,置于Q235材质地脚螺栓模拟缺陷之上,灌注碳纤维树脂胶泥,并震动使其密实化和固化,如图2、图3所示。每种尺寸的试样各制备两根,彻底干燥后进行拉伸试验。



图1 碳纤维管

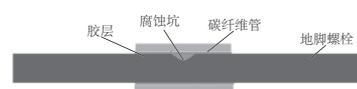


图2 碳纤维管补强试件

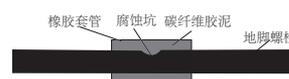
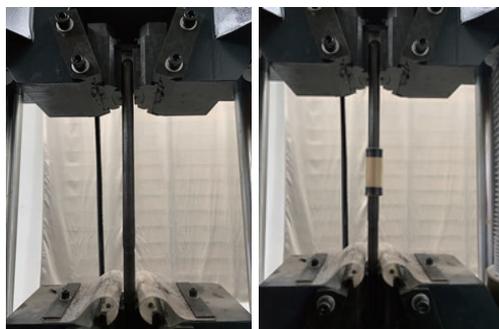


图3 碳纤维胶泥填充后补强试件

1.3 试验加载设备及试验过程

拉伸试验在 1000 kN 材料万能试验机上进行,将制备好的试样正确安装在试验机的夹具内,使试件中心线和钳口里的中心线吻合,如图 4 所示。试验连续缓慢加载,加载速率控制为 0.5 kN/s。在试验过程中,观察记录碳纤维补强部位在加载过程的变化情况及其破坏形态。



(a) 地脚螺栓试件 (b) 碳纤维补强试件

图 4 碳纤维补强试件拉伸试验

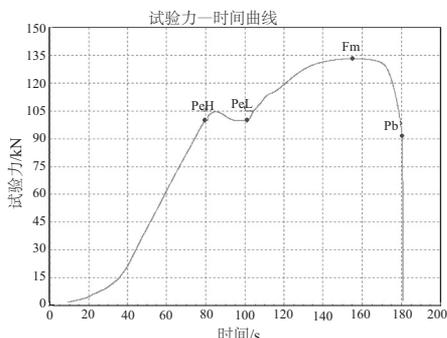
2 试验结果及分析

2.1 破坏过程及破坏特征

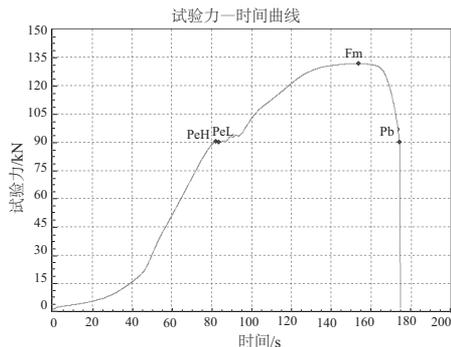
在拉伸试验加载初期,试件外观等均无明显变化,当荷载加到屈服极限 σ_s 的 70% 以后,2 mm 厚碳纤维补强试件出现少许波动和异响,最后试件断裂于未补强钢杆处。3 mm 及以上厚度的碳纤维补强试件拉伸过程中未出现该现象,试件均断裂于未补强钢杆处。对拉断后的所有试件碳纤维补强部位进行剥离,采用 10 倍放大镜进行观察,在 2 mm 厚碳纤维补强试件的碳纤维管和碳纤维树脂胶泥上发现呈 45° 的微小裂纹,3 mm 及以上厚度的碳纤维补强试件未见此情况。

2.2 试验结果分析

拉伸试验结果显示,所有碳纤维补强试样均断裂于母材部位,未发生断裂在补强部位的情况,其拉伸应力应变曲线与无缺陷地脚螺栓的应力应变曲线相近,如图 5 所示。试验结果说明选择的所有补强尺寸均达到了补强的强度要求。



(a) 无缺陷地脚螺栓拉伸曲线



(b) 碳纤维补强试件拉伸曲线

图 5 碳纤维补强地脚螺栓拉伸曲线

在加载过程中,试样补强部分的外观均没有明显变化,但 2 mm 厚碳纤维补强试件会出现异响。通过对所有补强试件拉断后补强部位的观察,2 mm 厚碳纤维补强试件的补强部位会出现微小裂纹,3 mm 及以上厚的碳纤维管可以保证碳纤维管增强体不产生微小裂纹等可能影响安全使用的欠缺,见图 6。因此,3 mm 及以上厚度的 T300 碳纤维复合管能够取得良好的补强效果,且能保证补强后的安全使用。



图 6 拉伸后的碳纤维增强体

2.3 综合分析

补强后的地脚螺栓在受力时,一部分载荷通过碳纤维树脂胶泥增强体黏结界面及黏结剂的剪切变形来传递到外层的碳纤维管上,从而降低了地脚螺栓的名义应力。地脚螺栓的材质及表面状态、碳纤维管的种类、碳纤维树脂胶泥增强体的长度与厚度等因素都会影响补强效果^[8]。

T300 碳纤维树脂复合材料的强度远大于常用结构钢,如 Q235、Q345、35#、45# 等钢材,只要碳纤维树脂胶泥增强体的强度和黏结强度足够,补强部位就不会发生断裂。因此,补强效果取决于碳纤维树脂胶泥增强体的强度和黏结强度。碳纤维树脂胶泥增强体的强度可以通过增加厚度来提高;黏结强度可以通过增加地脚螺栓表面粗糙度、增加碳纤维树脂胶泥增强体与地脚螺栓和与 T300 碳纤维复合管的接触表面积来提高,而增加 T300 碳纤维复合管的长度即可实现接触面积的增加。采用砂轮打磨地脚螺栓可使其表面粗糙,可进一步增大黏接面积。

根据试验结果可知,碳纤维树脂胶泥补强体的厚度 > 3 mm,碳纤维补强体长度 > 90 mm 即可很好满足补强要求。

实际上,高压输电线路杆塔用地脚螺栓有多种规格尺寸,需选用不同规格的碳纤维管,根据以上试验结果,提出一种碳纤维管尺寸选取原则:

- 1) 碳纤维补强管长度应大于地脚螺栓腐蚀缺陷轴向

长度与4倍地脚螺栓直径之和,补强实施时应保证于缺陷部位两端各外延 ≥ 2 倍地脚螺栓直径长度。

2) 碳纤维补强管直径不小于地脚螺栓直径与碳纤维补强管壁厚的1.15倍之和。

3) 碳纤维补强管壁厚不小于地脚螺栓直径的15%。

3 结语

1) 通过综合分析现场实施适用性、补强体强度性能、抗腐蚀性和耐久性等各种因素,提出通过粘贴碳纤维管对输电线路地脚螺栓腐蚀缺陷进行现场补强的方法。

2) 通过对厚度分别为2 mm、3 mm、4 mm的碳纤维树脂胶泥增强体试样进行拉伸试验,验证和比较了不同厚度碳纤维树脂胶泥增强体的补强效果。结果表明,通过灌注碳纤维树脂胶泥粘贴碳纤维管的方法补强腐蚀受损地脚螺栓能够满足安全使用的强度要求,且碳纤维树脂胶泥增强体厚度 ≥ 3 mm时可以达到良好效果。

3) 针对灌注碳纤维树脂胶泥粘贴碳纤维管补强方法具体工程应用时碳纤维补强管长度、厚度、直径等关键参数的选取问题,结合试验结果提出了推荐性的选取原则,有利于指导工程实践。

参考文献:

- [1] 邓小康. 铁塔地脚螺栓及塔脚锈蚀严重的修复加固[J]. 通信电源技术, 2018, 35(1): 165-166.
- [2] 李志明, 梁美玉, 付天孟. 相控阵超声检测预埋螺栓腐蚀的可行性研究[J]. 机电信息, 2019(29): 65-66.
- [3] 余倩倩, 顾祥林, 陈涛, 等. 碳纤维增强复合材料板补强平面向外纵向焊接接头疲劳性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(增刊1): 406-410.
- [4] 刘方, 张桐欢, 郑鑫超, 等. T700碳纤维增强复合材料螺栓连接的渐进损伤分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(15): 5983-5989.
- [5] 高佳佳, 楚珑晟, 马天阳, 等. 纤维增强树脂基复合材料连接结构强度与失效分析[J]. 航空制造技术, 2020, 63(11): 94-101.
- [6] 陈健, 鲁成云. 碳纤维复合材料补强技术在输油管道维修中的应用[J]. 石油知识, 2010(2): 40-41.
- [7] 吴德山, 王建生, 张瑞祥, 等. 一种耐高压聚氨酯包碳碳纤维复合管及其制造方法.
- [8] 林志明. 钢构件应力强度因子的有限元分析[D]. 大连: 大连海事大学, 2014.

收稿日期: 2020-08-17

(上接第60页)

从弹簧断口形貌判定为典型的缺口应力疲劳失效特征,综合以上检测结果,结合该试件的工艺及试验工况分析判断可知,断裂诱因可考虑为1#表面裂纹扩展后疲劳断裂,从而导致2#弹簧失稳挤压磨损疲劳断裂。

1) 弹簧材料化学成分、非金属夹杂物,热处理后各部位硬度及组织等均符合标准要求。

2) 1#弹簧表面裂纹缺陷位置呈现陈旧性氧化断面,即该弹簧在试验前已经裂开。

3) 从金相组织检查及EDS分析结果可知,裂纹缺陷表面氧化严重,说明该区域是受到了较长时间的高温过程(材料临界点以上加热)。根据弹簧生产工艺流程,其中有一步骤为440℃、50 min回火。因为该过程加热温度高、保温时间长,具备产生高温氧化的条件,所以初步判定该缺陷应该在回火前即产生。

3 结语

本文通过对失效弹簧断口形貌检测、金相显微组织检测及硬度和质量分数分析,得出弹簧在回火前已经氧化严重,缺陷在实验前已经产生。根据弹簧生产工艺,回火阶段最有可能产生高温氧化,在此阶段须控制好回火条件可以减少缺陷产生的可能。希望通过分析此次弹簧断裂的案例,为弹簧的设计和热处理工艺提供相关参考依据。

参考文献:

- [1] 陆峰峰, 杨国来. 考虑本身质量的圆柱螺旋弹簧动态特性研究[J]. 机械制造与自动化, 2015, 44(4): 27-29, 46.
- [2] 钱国强, 陈昕, 张韶佳. 螺旋压缩弹簧断裂分析[J]. 失效分析与预防, 2018, 13(4): 238-242.
- [3] 曾祥璞. 圆柱螺旋弹簧的可靠性优化设计[J]. 机械制造与自动化, 2005, 34(5): 15-18.
- [4] 陈磊, 庞院, 高朝乾. 后螺旋弹簧断裂失效分析[J]. 汽车零部件, 2018(1): 74-77.
- [5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 金属平均晶粒度测定方法: GB/T 6394—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [6] 国家技术监督局. 钢的显微组织评定方法: GB/T 13299—1991[S]. 北京: 中国标准出版社, 1992.
- [7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 钢中非金属夹杂物含量的测定—标准评级图显微检验法: GB/T 10561—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 钢件薄表面总硬化层深度或有效硬化层深度的测定: GB/T 9451—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.

收稿日期: 2019-10-14