

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.03.015

纤维张力及均匀性对输电导线复合芯性能影响^{*}

兰逢涛¹, 陈新¹, 阳武¹, 杨青¹, 杨长龙²

(1. 全球能源互联网研究院, 先进输电技术国家重点实验室, 北京 102209; 2. 国网辽宁省电力有限公司沈阳供电公司, 沈阳 110003)

摘要: 讨论了碳纤维复合芯拉挤工艺中纤维张力及张力均匀性对复合芯强度及成本的影响。试验利用纤维张力计测定碳纤维复合芯拉挤生产过程中的纤维张力, 研究了不同张力条件下碳纤维复合芯抗拉强度、卷绕性能与张力关系, 同时通过控制纤维张力的均匀性研究纤维张力均匀性与复合芯径向耐压强度的关系。试验结果表明, 纤维张力的大小及均匀性对拉挤复合芯棒综合性能具有明显的影响, 复合芯拉伸强度随着纤维张力的增加逐渐增加, 当张力控制在 0.6% 纤维强力时为最佳制备工艺; 纤维张力的均匀性提高, 且复合芯棒的径向耐压性能提高。通过控制纤维张力可以相应减少碳纤维原材料用量, 达到降低碳纤维复合芯成本的目的, 有利于碳纤维复合芯导线的大规模推广应用。

关键词: 纤维张力; 复合材料; 碳纤维复合芯; 低成本

中图分类号: TB323 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)03-0069-04

Influence of Fiber Tension and Tension Evenness on Performance of Composite Cores in Transmission Line

Lan Fengtao¹, Chen Xin¹, Yang Wu¹, Yang Qing¹, Yang Changlong²

(1. State Key Laboratory of Advanced Transmission Technology, Global Energy Interconnection Research Institute, Beijing 102209, China;

2. State Grid Shenyang Electric Power Supply Company, Shenyang 110003, China)

Abstract : Influences of fiber tension and tension evenness on the strength and cost of composite cores in the pultrusion process of carbon fiber reinforced composite cores were focused. Fiber tensiometer was used in the experiment to measure the fiber tension during the pultrusion process of carbon fiber reinforced composite cores. The relationships between the tensile strength and winding performance of carbon fiber reinforced composite cores and fiber tension under different tension conditions were studied, the relationship between fiber tension evenness and radial compressive strength of composite cores was also studied through controlling the evenness of fiber tension. The experimental results show that the fiber tension and the tension evenness have obvious influence on the comprehensive performance of pultrusion composite core rod. Tensile strength of composite cores gradually increases with increasing fiber tension. And the optimum preparation process is obtained when the tension is controlled at 0.6% of fiber strength, the evenness fiber tension is increased and the radial compressive strength of composite core rod is also increased. Raw material usage of carbon fiber can be reduced correspondingly through controlling fiber tension, achieving reducing cost of carbon fiber reinforced composite cores, which will contribute to the large-scale application of carbon fiber composite core conductor.

Keywords : fiber tension ; composite material ; carbon fiber reinforced composite core ; low cost

碳纤维复合芯导线是利用碳纤维的高强度、耐腐蚀的卓越性能发展出来的一种新型导线^[1-3]。与常规的钢芯铝绞线相比, 其具有质量轻、拉伸强度高、耐高温、耐腐蚀、载流量大、线损少、弧垂小等一系列优势^[4-6]。碳纤维复合材料的高强及低热膨胀等特性使得碳纤维复合芯导线有诸多特点, 在特定的应用环境下具有技术优势, 主要体现在强度高, 约为普通钢芯的 2 倍; 热膨胀系数为钢芯的 1/7, 高温时弧垂增量小, 可实现大容量输送。由于碳纤维复合芯导线的导体材料采用软铝, 其电导率高, 可减少输电损失; 导体采用型线, 相同标称截面的碳纤

维复合芯导线质量较轻或相同外径的碳纤维复合芯导线标称截面积更大, 线损更小。截止 2016 年, 国外棒状碳纤维复合芯导线已投运于包括我国、欧洲、印度尼西亚、巴西、韩国等 10 多个国家和地区 20 000 余公里, 电压等级覆盖 13.8 kV 到 500 kV。

国内自主研发的碳纤维复合芯导线, 其技术性能已达到国外同类型产品的技术水平, 到目前为

^{*} 国家电网公司科技项目 (5455DW140006)

联系人: 兰逢涛, 博士, 工程师, 主要从事输变电复合材料的研究和应用

收稿日期: 2016-12-10

止,国内已有 300 多条碳纤维复合芯导线输电线路运行,主要以增容改造或扩建为主,电压等级覆盖 35 kV 到 500 kV,单线总长度超过 20 000 公里,我国已成为世界上使用碳纤维复合芯导线最多的国家。

碳纤维复合芯导线虽然性能优异,但价格是传统钢芯铝绞线 3 倍左右,严重阻碍了碳纤维复合芯导线在电网的大规模推广应用^[7-9]。目前降低碳纤维复合芯导线成本的途径主要包括纤维混杂技术、原材料国产化以及提高生产效率等,但仍未达到大范围推广的技术经济性要求^[10-12]。笔者拟从提高纤维强度贡献率角度出发,通过控制张力及均匀性,最大程度集中发挥纤维强度优势,从而通过节省碳纤维用量降低复合芯成本,进一步推动碳纤维复合芯导线在国家电网公司等单位大范围推广应用。

1 实验部分

1.1 主要原料

碳纤维: 12K T700 级,日本东丽集团;

玻璃纤维: 24000 Tex 无捻 E 玻纤,中国巨石集团;

环氧树脂: 4,4'-二氨基二苯甲烷四缩水甘油胺型环氧树脂 (EPHY),美国亨斯迈集团;

固化剂: 甲基四氢苯酐,上海邦成化工有限公司。

1.2 主要仪器及设备

复合芯拉挤设备: NLY-10T 型,南京诺尔泰复合材料设备制造有限公司;

液压自动真空搅拌机: THZ-200 型,韞锐机械设备有限公司 (上海) 有限公司;

电子万能材料试验机: Instron 5569 型,英斯特朗 (上海) 试验设备贸易有限公司;

碳纤维复合芯卷绕试验机: JRT-6 型,河北方圆仪器有限公司;

手持式数字张力测量仪: HUN-5000-ASY 型,上海祈仪环保科技有限公司。

1.3 试样制备

碳纤维复合芯棒是由单向玻璃纤维 / 碳纤维增强高耐热环氧树脂,通过快速拉挤生产工艺制备而成。环氧树脂和甲基四氢苯酐固化剂按 1 : 2 的质量比计量并混合,用真空搅拌机搅拌 30 min 后室温下静置一段时间,以排除内部气泡,再注入 50℃ 浸胶槽浸润碳纤维 (38 束) 和玻璃纤维 (40 束),最后按照拉挤工艺在 200℃ 进行固化和后固化,获得

碳纤维复合芯棒,复合芯玻璃化转变温度 195.2℃。

1.4 性能测试

(1) 张力试验设计。

日本东丽 T700, 12 K 单束碳纤维强力为 2 260 N, 试验纤维张力设定为单束纤维强力的 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8%, 1% 5 个级别; 纤维张力测试如图 1 所示, 通过张力测量仪, 可对每根纤维浸胶后张力进行实时测量。利用纤维纱架开卷辊摩擦带张力调节旋钮对纤维张力大小和均匀性进行连续调节, 张力偏差范围不超过设定值的 5%。



图 1 纤维张力测试图

(2) 性能测试。

碳纤维复合芯拉伸强度和径向耐压强度测试方法分别参照 GB/T 13096-2008 和 GB/T 29324-2012 执行, 拉伸强度试样长度 1.5 m, 加载速率 20 mm/min。

碳纤维复合芯棒的韧性及卷绕后拉伸强度测试方法参照 GB/T 29324-2012 执行, 芯棒应在 55D (D 为芯棒直径) 的筒体上以不大于 3 r/min 的卷绕速度卷绕一圈, 芯棒应不开裂, 不断裂。

2 结果与讨论

2.1 纤维张力的影响

在复合材料芯拉挤成型工艺中, 纤维张力源自 2 个方面^[13]: 纤维开卷辊放线时, 在卷辊中心轴上产生阻力矩, 纤维材料张力随卷辊半径变化而变化; 在浸胶过程中, 纤维材料与浸胶导向辊之间由于有正应力的存在而产生摩擦形成张力, 张力的大小与摩擦系数和正应力大小相关。通过控制开卷辊阻力矩, 可以对纤维张力大小进行调节。

(1) 纤维张力对复合芯拉伸强度的影响。

图 2 为纤维张力与复合芯拉伸强度的关系图, 由图 2 可知, 复合芯的拉伸强度与纤维张力密切相关。复合芯拉伸强度随纤维张力增加快速提高, 纤维张力超过纤维强力的 0.8% 时, 复合芯的拉伸强度增加趋势放缓; 当纤维张力从 0.2% 增加到

0.6%时,碳纤维复合芯强度从2480 MPa提高至2730 MPa,拉伸强度增幅约为10%。碳纤维复合芯强度随纤维张力增加而提高主要归因于纤维张力的增加提高了纤维排布的均匀性,降低了纤维屈曲程度,从而有效地提高了纤维强度的整体发挥率。

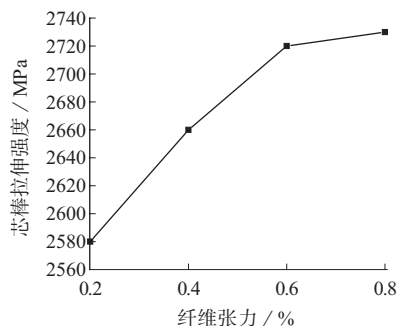


图2 纤维张力与复合芯拉伸强度的关系图

(2) 纤维张力对复合芯卷绕性能的影响。

图3为不同纤维张力条件下复合芯卷绕性能测试结果。

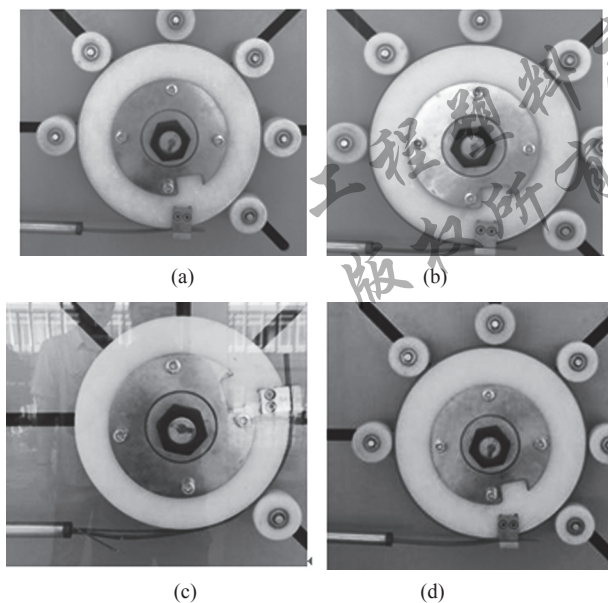


图3 复合芯棒卷绕性能测试结果

卷绕性能用来表征碳纤维复合芯棒韧性优劣,芯棒韧性越好,卷绕半径越小,复合芯抗剪切破坏的能力越强,挂线施工和运行风险降低。从卷绕测试结果可以看出,随着纤维张力的增大,复合芯棒的卷绕性能有所提高,从无张力时的50D提高至0.6%张力条件下的45D,且卷绕试验后复合芯棒拉伸强度满足GB/T 29324-2012要求。复合芯棒韧性提高主要因为固化成型后的降温过程中,纤维与树脂

热膨胀系数差异必定导致内应力产生,其中纤维受到压应力作用,树脂承受拉应力,纤维张力提高有助于消除复合芯棒中的内应力,使复合芯棒具有更好的力学性能。

图4为纤维张力与复合芯拉挤设备牵引力的关系。由图4可以看出,纤维张力增加会导致复合芯拉挤牵引力的增加,当张力达到1%时,拉挤设备牵引力已经达到9.6 kN,接近拉挤设备的牵引力上限,因此应避免施加过高纤维张力。研究表明,当纤维张力较小时,复合芯更易发生碳纤维分布不均,从而出现复合芯表面的质量缺陷;同时当纤维张力较小时,纤维浸胶后携带树脂含量有所提高,这样极大地增大了堵模的风险,因此复合芯拉挤过程中纤维张力控制非常必要。纤维张力增加虽然可以明显提高复合芯的强度,但过高的牵引力会增加生产成本,因此结合图2,纤维张力采用纤维强力的0.6%左右为宜。

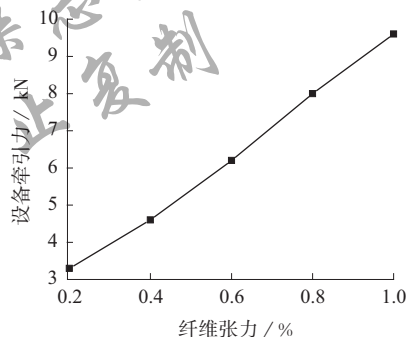


图4 纤维张力与复合芯拉挤牵引力关系图

2.2 纤维张力均匀性的影响

纤维张力均匀性试验首先调节全部纤维张力至纤维强力的0.6%,然后通过松动放线辊张力从而减小部分纤维张力至0.2%,利用放松纱线数量与总纤维数量比例控制不均匀度。

(1) 张力均匀性对复合芯拉伸强度的影响。

纤维张力不均匀度与复合芯棒拉伸强度的关系如图5所示。

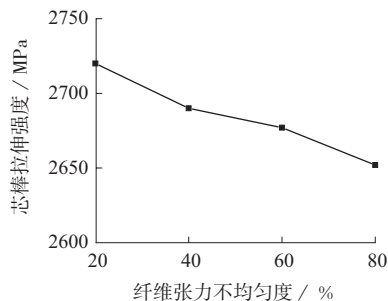


图5 纤维张力不均匀度与复合芯棒拉伸强度的关系图

由图5可见,纤维张力均匀性明显影响碳纤维复合芯拉伸强度。随着纤维张力不均匀程度的提高,

复合芯拉伸强度逐渐下降。分析表明,碳纤维复合芯强度下降主要原因为:纤维张力下降导致纤维润湿性变差,从而导致纤维/树脂界面结合减弱;由于纤维张力差异越大,纤维排布存在相互交叉、搭叠和偏心等情况,纤维整体强度贡献率下降。

(2) 张力均匀性对复合芯径向耐压强度影响。

不同纤维张力均匀度下碳纤维复合芯径向耐压强度测试结果如图6所示,由图6可以看出,碳纤维复合芯径向耐压强度随纤维张力不均变化较大。随着纤维张力不均匀性增加,碳纤维复合芯径向耐压强度逐渐降低。当不均匀性超过60%时,碳纤维复合芯径向耐压强度低于30 kN,不能满足《GB/T 29324 碳纤维复合材料芯架空导线》对碳纤维复合芯径向耐压强度要求。因此控制纤维张力均匀性亦是获得性能优异产品的关键因素。

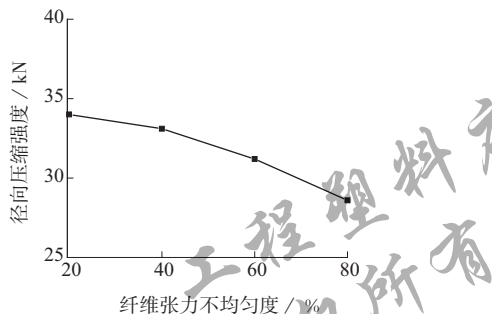


图6 不同纤维张力均匀度下碳纤维复合芯径向耐压强度测试结果

2.3 纤维张力与复合芯成本的关系

碳纤维复合芯强度取决于碳纤维的数量和纤维强度贡献率,由于控制纤维张力并保持一定的张力均匀性简单易行,因此通过增加纤维张力提高纤维强度贡献率、减少碳纤维用量是降低碳纤维复合芯成本的一条可行方案。当纤维张力从0.2%增加到0.6%时,碳纤维复合芯拉伸强度可达到2730 MPa,通过逐根减少碳纤维数量,当复合芯强度降至2430 MPa (满足GB/T 29324规定碳纤维复合芯拉伸强度不小于2400 MPa)时可减少纤维用量5根,碳纤维用量由最初38束下降到33束,对应碳纤维成本下降900元/km,复合芯成本下降约8%。按照“十三五”期间每年大约6000 km挂线里程计算,仅通过提高纤维强度贡献度,共计可节省导线采购成本约9050万元,这一措施有效地提高复合芯导线经济技术性。

3 结论

(1) 通过控制碳纤维张力及其均匀性,可以大幅

度地提高纤维强度贡献率,充分发挥碳纤维强度优势,提高碳纤维复合芯综合性能;

(2) 随着碳纤维张力的增大和纤维张力均匀性的提高,张力拉挤工艺对纤维屈曲度和树脂含量的改善明显,复合芯的拉伸强度和径向耐压强度明显提高;

(3) 改进拉挤工艺中纤维张力,在达到技术要求的情况下,可以成功减少碳纤维用量,从而达到降低复合芯的成本、提高导线经济技术性能,有利于碳纤维复合芯导线在国网的大规模推广应用。

参考文献

- [1] 张国光. 碳纤维复合芯导线在电力传输线路上的应用[J]. 山西电力, 2008(2):45-46.
Zhang Guoguang. Application of aluminum conductor composite core in electric power transmission line[J]. Shanxi Electric Power, 2008(2):45-46.
- [2] 何州文, 陈新, 药宁娜. 环境温度对架空导线用碳纤维复合芯成型工艺及性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2011, 39(9):46-49.
He Zhouwen, Chen Xin, Yao Ningna. Effect of ambient temperature on forming process and performance of carbon fiber reinforced composite core used for overhead transmission lines[J]. Engineering Plastics Application, 2011, 39(9):46-49.
- [3] 韩钰, 陈新. 智能电网用新材料技术发展现状[J]. 智能电网, 2014(4):8-11.
Han Yu, Chen Xin. Development status of new materials technology used in smart grid[J]. Smart Grid, 2014(4):8-11.
- [4] 王秋玲, 何州文, 张卓. 新型导线用碳纤维复合材料的拉挤成型工艺技术研究[J]. 工程塑料应用, 2010, 38(2):33-35.
Wang Qiuling, He Zhouwen, Zhang Zhuo. Pultrusion molding process technology of carbon fiber composite used for new cable[J]. Engineering Plastics Application, 2010, 38(2):33-35.
- [5] 刘辉, 陈新, 王英男. 耐高温碳纤维复合芯基体树脂研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2013(3):23-26.
Liu Hui, Chen Xin, Wang Yingnan. Research on the resins for high temperature carbon fiber composite in power transmission and distribution[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2013(3):23-26.
- [6] 何州文, 陈新, 药宁娜. 架空导线用碳纤维复合芯固化剂应用研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2012(1):77-80.
He Zhouwen, Chen Xin, Yao Ningna. Application of curing agent in carbon fiber composite core for overhead transmission lines[J]. Engineering Plastics Application, 2012(1):77-80.
- [7] Alawar A, Bosze J, Nutt R. A composite core conductor for low sag at high temperatures[J]. IEEE Transaction of Power Delivery, 2005(20):2193-2199.

(下转第93页)

自动脱螺纹机构的设计方法、设计螺纹型芯时需注意的问题及保证钢制针头在模具中的安装定位精度的方法。笔者本模具的自动脱螺纹机构中采用油缸驱动,能很好地控制螺纹型芯的轴向位移精度,解决了客户以前类似模具采用液压马达驱动致使螺纹型芯轴向定位不准,产品有飞边的问题,采用该模具生产的产品得到客户的好评。

参考文献

- [1] 张克惠. 塑料材料学 [M]. 西北工业大学出版社, 2000.
Zhang Kehui. Plastic material science [M]. Beijing:Northwestern Polytechnic University Press, 2000.
 - [2] 伍先明, 王群. 塑料模具设计指导 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
Wu Xianming, Wang Qun. Plastic mould design guidance [M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2006.
 - [3] 许发铤. 实用模具设计与制造手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
Xu Fayue. Practical mould design and manufacturing manual [M]. Beijing:Mechanical Industry Press, 2005.
 - [4] (德) 林纳 E. 恩格 P. 注射成型模具设计 108 例 [M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2000.
(Germany)Lindner E, Unger P. injection molds 108 proven designs [M]. Beijing:China Light Industry Press, 2000.
 - [5] 翁其金. 塑料模塑成型技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
Weng Qijin. Plastic molding technology [M]. Beijing:Mechanical Industry Press, 2001.
 - [6] 陈再枝, 马党参. 塑料模具应用手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
Chen Zaizhi, Ma Dangshen. Plastic mold application manual [M]. Beijing:Chemical Industry Press, 2005.
 - [7] 张维合. 注塑模具复杂结构 100 例 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
Zhang Weihe. 100 cases of complex structure of plastic injection mold [M]. Beijing:Chemical Industry Press, 2010.
 - [8] 洪慎章. 实用注塑模具结构图册 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2006.
Hong Shenzhang. Practical Injection mould structure atlas [M]. Shanghai:Shanghai Jiaotong University Press, 2006.
 - [9] 刘岩. 面向制造的注塑模具结构设计 [J]. 高科技通讯, 2002, 12(10):50-53.
Liu Yan. The structure design of injection mould for manufacture [J]. Chinese High Technology Letters, 2002, 12(10):50-53.
 - [10] 申树义. 塑料模具设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
Shen Shuyi. Plastic mold designation [M]. Beijing:Mechanical Industry Press, 2005.
 - [11] 屈华昌. 塑料成型工艺与模具设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
Qu Huachang. Plastic forming technology and die design [M]. Beijing:Mechanical Industry Press, 2004.
 - [12] 王永平. 注塑模具设计经验点评 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
Wang Yongping. Comments on injection die design [M]. Beijing:Mechanical Industry Press, 2005.
 - [13] 华希俊, 张培耘. 模具工业先进制造技术特点及发展概况 [J]. 金属成形工艺, 2001, 19(1):3-5.
Hua Xijun, Zhang Peiyun. Summary on development of the advanced manufacturing technic of die & mould industry [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2001, 19(1):3-5.
 - [14] 李发致. 模具先进制造技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
Li Fazhi. Molding advanced manufacturing technology [M]. Beijing:Mechanical Industry Press, 2003.
 - [15] 邓明. 现代模具制造技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
Deng Ming. The advanced mold manufacturing technology [M]. Beijing:Chemical Industry Press, 2005.
-
- (上接第 72 页)
- [8] 李磊, 陈伟, 万建成. 碳纤维复合材料芯导线在国内推广应用的技术经济分析 [J]. 电力建设, 2012, 33(9):79-82.
Li Lei, Chen Wei, Wan Jiancheng. Technical and economic analysis on popularization and application of conductor with reinforced core of carbon fiber in China [J]. Electric Power Construction, 2012, 33(9):79-82.
 - [9] 兰逢涛, 陈新, 杨青, 等. 湿热条件对输电线路碳纤维复合材料芯柔量的影响 [J]. 智能电网 2015, 3(9):806-810.
Lan Fengtao, Chen Xin, Yang Qing, et al. Impact of temperature and humidity on the creep compliance of carbon fiber reinforced composite core used in transmission lines [J]. Smart Grid, 2015, 3(9):806-810.
 - [10] 柏晓路, 李健, 徐大成, 等. 碳纤维复合芯导线在 500 kV 新建线路中应用的技术经济分析 [J]. 电力建设, 2013, 34(10):29-33.
Bo Xiaolu, Li Jian, Xu Dacheng, et al. Technical and economic analysis of ACCC applied in new 500 kV power transmission lines [J]. Electric Power Construction, 2013, 34(10):29-33.
 - [11] 杨长龙, 田超凯, 王志伟, 等. 碳纤维复合芯导线全寿命周期年费用法的选型研究 [J]. 玻璃钢 / 复合材料, 2015(11):59-63.
Yang Changlong, Tian Chaokai, Wang Zhiwei, et al. The research on the selection of carbon fiber core conductors within the whole lift cycle annual cost [J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2015(11):59-63.
 - [12] 王新营, 黄一钊, 严波, 等. 架空导线用混杂纤维增强复合芯力学性能的研究 [J]. 电线电缆, 2010(3):28-30.
Wang Xinying, Huang Yizhao, Yan Bo, et al. Study of the mechanical property of the mixed fiber reinforced composite core in overhead conductors [J]. Electric Wire & Cable, 2010(3):28-30.
 - [13] 许家忠, 刘丹, 乔明, 等. 基于热芯缠绕工艺的缠绕张力研究 [J]. 纤维复合材料, 2012(3):20-22.
Xu Jiazhong, Liu Dan, Qiao Ming, et al. Research on the winding tension based on heated-mandrel winding [J]. Fiber Composites, 2012(3):20-22.