

基于碳纤维导线压接特性与金具选型的研究

姜广东¹, 严行建², 宋丹², 仝娜³, 严晓威⁴

(1.南京电力金具设计研究院, 江苏南京 210037;

2.江苏省宏源电力建设监理有限公司, 江苏南京 210024;

3.江苏易鼎电力科技有限公司, 江苏宿迁 223800; 4.远东复合技术有限公司, 江苏宜兴 214257)

摘要:从复合芯导线生产工艺、结构、玻璃纤维、碳纤维及树脂固化剂的共性和各自物理性、力学性能, 结合输电线路运行特征, 进行综合性调研、分析和试验, 认为碳纤维复合芯导线在输电工程中不宜采用压缩型电力金具, 以防将来产生导线断裂事故。碳纤维复合芯导线只能应用楔型电力金具, 才能保证碳纤维复合芯导线的运行安全。

关键词:碳纤维; 复合芯; 导线; 压缩型; 电力金具; 分析研究

中图分类号: TM247

文献标志码: B

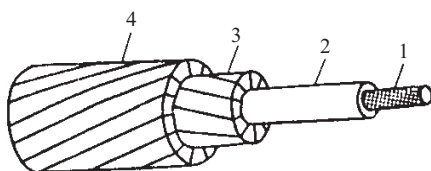
文章编号: 1009-0665(2012)03-0057-03

近年来, 碳纤维复合芯导线在国内外输电工程中广泛使用, 国内近 200 多个改造增容工程采用该导线, 可降低成本, 降低线损, 提高输电容量, 节省通道资源, 有助于构造安全、环保、高效节能型输电网络, 具有较好的社会效益和经济效益, 其配套电力金具同样具有良好的前景^[1]。碳纤维复合芯导线由于其结构的特殊性, 常用的耐张线夹和接续管不宜使用, 而是采用一种利用楔型自锁原理的耐张线夹和接续管, 其结构是将常规压接钢管改为楔型自锁式新型耐张线夹和接续管^[2]。目前国内生产和正在研制上述 2 种金具的有不少厂家, 其中江苏宇飞电力科技有限公司对金具进行了独特的改进, 有效缩短了金具尺寸, 形成自有专利, 并通过中电联的鉴定, 已在多条线路工程中成功应用^[3]。

1 碳纤维复合芯导线结构及生产工艺

1.1 碳纤维复合芯导线结构

碳纤维复合芯导线结构如图 1 所示, 其芯线是由碳纤维为中心层, 高模量高强度 S 型玻璃纤维外包浸渍高温模量树脂固化制成的单根芯棒或多根绞合复合芯棒, 铝线股为 T 型截面^[4]。



1 为碳纤维增强环氧树脂的内芯; 2 为玻璃纤维增强环氧树脂外芯; 3 为第一层梯形铝导线; 4 为第二层梯形铝导线

图 1 碳纤维复合芯导线

1.2 碳纤维复合芯生产工艺

1.2.1 主要原材料

碳纤维复合芯是由碳纤维和玻璃纤维或其他

纤维通过拉挤成型的方式制成的单根芯棒, 碳纤维通过耐热处理、碳化而成; 高强度、高韧性配方的环氧树脂具有很强耐冲击性、耐抗拉应力和弯曲应力。将碳纤维与玻璃纤维进行预拉伸后, 用环氧树脂浸渍, 然后在模具中高温固化成型为复合材料芯线^[5]。其主要原材料如表 1 所示。

表 1 主要原材料

原料名称	规格及性能
碳纤维	PANEX®35, 50 K, 拉伸强度 ≥ 4.1 GPa
高强玻璃纤维	12 K, 拉伸强度 ≥ 4.6 GPa
环氧树脂	多官能团环氧树脂, 酚醛类环氧树脂

1.2.2 复合芯生产工艺流程及存在缺陷

复合芯采用拉挤工艺如图 2 所示, 将树脂、固化剂、促进剂、填料等按一定比例混合, 用搅拌机搅拌均匀后, 注入树脂浸槽, 纤维浸渍树脂后进入模具连续固化成型。一般来说, 碳纤维占 35%, 玻璃纤维占 35%, 增韧环氧树脂占 30%。将碳纤维整经, 单向(0°)集束, 在线浸渍韧性环氧树脂溶液, 然后包覆玻璃纤维, 通过钢制模口, 控制其直径, 然后在 260°C 固化成型, 整个工艺为连续制造。这种拉挤工艺使纤维产生拉伸微型裂纹, 树脂固化过程因搅拌时灰尘、水气等杂物的侵入, 固化层内易产生夹杂、气泡和孔洞等宏观缺陷。一旦受力超过极限应力, 如压缩应力等作用, 这些缺陷因复合材料徐变特性, 缺陷随时扩大而至破断, 故压缩型电力金具不能应用于碳纤维复合芯导线。

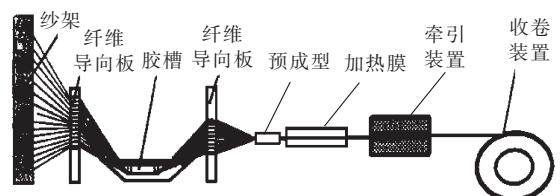


图 2 拉挤工艺示意图

2 复合芯的压缩性能

应用压缩性能的力学原理分析,当复合芯受压时,纤维片和树脂片都将受到压力,纤维片可能出现失稳现象,受着树脂的横向支撑,相当于在弹性基础上的杆件失稳问题。失稳的基本形式有2种,一是相邻两纤维片反向屈曲,此时树脂承受横向拉压应力,称为拉伸型失稳;二是相邻两纤维片同向屈曲,此时树脂受着剪应力,称为剪切型失稳^[6]。

由于压缩的不确定性,再采用较大压缩外力,构件受力更为复杂,其后果难以预测,故不宜采用压缩型电力金具。

3 碳纤维、玻璃纤维和环氧树脂共性及性能

3.1 强度和弹性性能的可设计性

碳纤维复合芯是由树脂、玻璃纤维和碳纤维组成,玻璃纤维和碳纤维的强度或弹性模量比树脂的强度或弹性模量高几十倍,而玻璃纤维和碳纤维在宏观范围内是单向强度的材料,所以玻璃钢和碳纤维的强度或弹性模量在相当程度上取决于所含的玻璃纤维量和碳纤维分布的方向,可在一定程度上设计出各种强度和弹性性能的产品。一般来说,可以设计成3种类型:一是准各向同性材料,二是2个垂直方向上有较高强度或弹性模量的正交各向异性材料,三是在一个方向上有特高强度的单向性材料。单向性材料主要可用作拉力构件如电线芯等,但其共性是受剪应力较低,故受到压缩突变剪应力时,构件随时会损坏。

3.2 主要缺陷

碳纤维复合芯具有复合材料共同优势之外,和所有复合材料一样也存在一些严重影响使用性能的缺陷。

(1) 复合芯的应力应变是线性的,破坏的概率单调递增^[6]。复合芯的缺陷是有一定的脆性,Griffith破坏理论认为:它的应力应变曲线直到破坏是线性的。股纱的应力应变曲线,则由于单纤维受力的不一致以及单纤维强度的不一致,呈现了一个逐步断裂的过程,直到残留的纤维不能承担最大的荷载时全部破坏。而这种破坏的概率,Weiball认为:随着应力的增加,破坏的概率是单调递增的,其概率密度函数为:

$$\varphi(\sigma) = \alpha\beta\sigma^{\beta-1} e^{-\alpha\sigma^\beta} \quad (1)$$

式中: $\sigma \geq 0$, $\beta > 0$, 为形状函数; $\alpha > 0$, 为特性函数。在强度 $< \sigma$ 时破坏概率为:

$$P = \int_0^\sigma \varphi(\sigma) d\sigma = 1 - e^{-\alpha\sigma^\beta} \quad (2)$$

两位专家共同认为,这是由于材料中自身存在着微裂缝或缺陷而产生高度集中应力使材料的宏观强度不断降低,最终导致材料破坏^[6]。

强度试验也证明,复合芯的破坏常常先是树脂开裂,然后再是纤维的断裂。压缩型电力金具在压缩时产生的集中应力,使复合芯产生微裂,该产品设计是不合理的。

(2) 复杂的疲劳损坏,破坏过程较长。疲劳破坏可以认为是材料内的裂缝形成和扩展的过程。对复合芯这类复合材料来说,问题更为复杂,一般说来,破坏首先开始于树脂和纤维界面的个别点上,这时在材料内已形成了微裂缝,这些微裂缝的进一步扩展,将使部分纤维断裂,裂纹扩展到相邻的纤维和树脂的界面上,或者出现较大区域的分层脱胶,这时试件的承载能力下降,阻尼增高,振幅减小,频率降低,最后导致大量纤维断裂或大区域的分层而破坏。整个疲劳损坏的过程是较长的,裂缝发展速度较慢。这就是压缩型电力金具在压缩后产生微裂而试验时力学性能合格原因所在。

(3) 复合材料的徐变性能。当材料受到一恒定载荷的作用时,除了初始的瞬时变形外,随着时间的增长,变形也随着增加,这种现象称为徐变^[6]。影响徐变性能的因素较多,主要有受力形式(拉、压、弯扭)、载荷方向、应力大小和温度等^[6]。复合材料的徐变有如下规律。

① 当主应力方向平行于径向或纬向纤维时,无论是拉伸还是弯曲徐变,其徐变量都较小,初始应变与徐变试验结束时的最终应变的比值都在0.7以上(复合材料)。

② 当主应力方向与经纬向成一定角度时,随着角度的增加而增大,当成 45° 时,徐变较激烈,拉伸徐变总应变约为初始应变的3倍。徐变不仅与时间有关,而且与应力的大小有关,在30%静强度的应力作用下,徐变总挠度约为初始挠度的5倍半。

③ 当应力大于静强度的50%时,试件相继发生徐变破坏,随着应力的增大,徐变时间相应缩短,即材料的持久强度随着时间的增长而降低。对同一种复合材料来说,尽管所受的应力不一样,但徐变破坏时的总应变值基本相同,随时间延长而变大。

当压缩型电力金具应用于碳纤维复合芯导线,复合芯徐变特征完全相同。故压缩型电力金具在复合芯导线试验时,虽然复合芯受到破坏,产生微裂纹,但力学性能仍为合格。当第一模压完后,发生单向突变(如图3所示),应力也产生了一定的角度。随着时间推移,很难不出现断裂安全事故。故压缩型电力金具不能应用于碳纤维复合芯导线。

4 碳纤维复合芯压缩后微观变化

根据文献,钢压接管压接后,伸长率为12%~15%,内径缩小10%~15%^[7],大于碳纤维复合芯3.5%综合延伸率,故碳纤维复合芯的玻璃纤维、碳纤维和树脂压缩后将产生各种数量不同和形状各异的微裂。

4.1 复合芯中纤维微裂机理

通常采用透射电镜(TEM)和扫描电镜(SEM)研究碳纤维复合芯中碳纤维的微裂机理、缺陷类型和强度分散性。

复合芯中碳纤维在压缩后,单根碳纤维产生突变牵伸点或细颈点,急剧变形,微裂剧增,如图3所示,这种急剧变形严重影响复合芯力学特性。

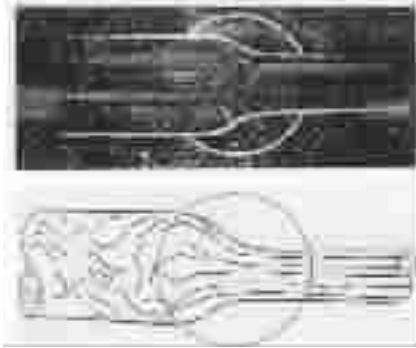


图3 压缩后单向突变

其最典型的是拉伸断裂,拉伸断裂与错排晶体有关^[8]。错排晶体是指晶体取向不是平行纤维轴,而是偏离纤维轴。一是受到剪切应力难以释放出来,形成了垂直于纤维轴方向的应力集中点,其方向上增值发展,也可能穿过相邻层面转移和释放剪切应力,最终导致纤维断裂。二是随着应力继续增加,当裂纹尺寸超过临界值时发生破坏性断裂。

4.2 碳纤维微观的缺陷类型

碳纤维微观缺陷大体可分为表面缺陷和内部缺陷两大类。同样大小的缺陷,表面缺陷对其拉伸强度的影响要大于内部缺陷^[8]。

(1) 碳纤维表面缺陷。表面缺陷主要有微圆斑沉和物、微划伤和划痕以及微外裂纹。

(2) 碳纤维内部缺陷。内部缺陷主要有,一是内微裂纹,如晶间裂纹;二是纤维径向和轴向微裂纹,这些微裂纹和缺陷形成是制造时压伸过头和刺伤所致,其形状各异。犬牙交错的径向裂纹,三重径向裂纹;上下已错位裂纹等。

4.3 格拉菲斯微裂纹理论

纤维和固化剂等属于脆性材料,其拉伸强度受控于各类缺陷,缺陷愈大,强度愈低,服从于Griffith微裂纹理论,即:

$$C = \frac{\gamma}{\pi} \times \frac{2E}{\sigma^2}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi C}} \quad (3)$$

式中: C 为基平面裂纹的尺寸(半径); γ 为表面自由能(4.2 J/m²); E 为杨式模量。

式(3)是脆性材料断裂力学的基础。此式把脆性材料中存在的裂纹等缺陷与拉伸强度关联在一起,拉伸强度随着裂纹尺寸的增加而降低,符合实际情况。因此,在生产碳纤维复合芯的过程中,采取各种技术措施降低和消除各种缺陷,以提高碳纤维复合芯的拉伸强度^[8]。

用电子显微镜从微观来研究复合芯中碳纤维微裂机理,缺陷类型和强度分散性等以及格拉菲斯微裂纹理论,都证明碳纤维复合芯导线不宜使用压缩型电力金具。

5 结束语

综上所述,碳纤维复合芯导线应用于输电线路工程时,不宜采用压缩型接续管和耐张线夹,只能使用楔型结构的接续管和耐张线夹。输电线路已经采用碳纤维导线压缩型电力金具的,理应全部更换为楔型电力金具,以免造成输电线路安全事故。

参考文献:

- [1] 严行建,王澄.ACCC导线的应用和金具的研制[J].电网与水利发电进展,2008(06):06-11.
- [2] 叶鸿声,黄伟中,王彬.碳纤维复合芯导线在跨越增容改造工程中应用探讨[C].新型架空输电线路技术与应用研讨会论文集,2010.
- [3] 何州文,陈新,王秋玲,等.国内碳纤维复合芯导线的研究和应用综述[J].电力建设,2010,31(4):90-93.
- [4] 尤传永.架空输电线路新型复合材料合成导线的开发和研究[J].电力建设,2004,25(11):1-6.
- [5] 王新营,严波,等.架空导线用50 kV碳纤维增强复合芯的性能研究[C].新型架空输电线路技术与应用研讨会论文集,2010.
- [6] 上海玻璃结构研究所.玻璃钢结构设计[M].北京:中国建筑工业出版社,1980.
- [7] 程应镗.送电线路金具的设计安装试验和应用[M].北京:水利电力出版社,1989.
- [8] 贺福.碳纤维及石墨纤维[M].北京:化学工业出版社,2010.

作者简介:

姜广东(1979),男,江苏盐城人,工程师,从事电力金具研究工作;

严行建(1945),男,湖南长沙人,高级工程师,从事输变电技术研究工作;

宋丹(1985),女,安徽宿州人,助理工程师,从事输变电技术工作;

- [4] 李景祿,李朝晖.自动补偿消弧装置用于配电网若干问题的讨论[J].高低压技术,2001(6):37-39.
- [5] 李福寿.消弧线圈自动调谐原理[M].上海:上海交通大学出版社,1993.
- [6] 李福寿.中性点非有效接地电网的运行[M].北京:水利电力出版社,1993.
- [7] 要焕年,曹梅月.参数增量法在优化谐振接地中的应用[J].电力设备,2000,1(3):21-24.
- [8] 李润先.谐振接地是我国中压电网最理想的接地方式[J].高电压技术,1994,20(1):40-43.

作者简介:

刘方韡(1990),男,江苏南京人,本科,南京邮电大学自动化专业在读。

成 兵(1967),男,安徽芜湖人,工程师,从事接地变、消弧线圈自动控制、站用电系统、直流系统工作;

汪 晨(1983),男,安徽芜湖人,助理工程师,从事变电运行等工作;

乔向阳(1984),男,安徽芜湖人,助理工程师,从事变电检修等工作。

Fault Disposing and Regulating Modes of Arc Suppressing Coils Grounding in 10 kV Substation

LIU Fang-wei¹, CHENG Bing², WANG Chen², QIAO Xiang-yang²

(1. Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210046, China;

2. Wuhu Power Supply Company, Wuhu 241027, China)

Abstract: The neutral grounding of power system is a comprehensive technical problem, which relate to power reliability, personal safety, equipment safety, insulation level, protective relaying and grounding device closely. The types of neutral grounding and the regulating and compensation modes of arc suppressing coils in 10 kV substation system are introduced. And the common fault types and their corresponding disposal methods are also analyzed, which can provide references for daily operation and maintenance and ensure the safety and reliability of power equipment.

Key words: arc suppressing coils; regulating mode; fault disposing; protective relaying

(上接第 59 页)

全 娜(1986),女,江苏宿迁人,助理工程师,从事输变电技术工作;

严晓威(1988),男,湖南长沙人,助理工程师,从事导线技术网络研究工作。

Research on the Selection of Power Fittings based on the Pressure Contact Characteristics of Carbon Fiber Wire

JIANG Guang-dong¹, YAN Xing-jian², SONG Dan², TONG Na³, YAN Xiao-wei⁴

(1.Nanjing Electric Power Fittings Design and Research Institute, Nanjing 210037, China; 2. Jiangsu Hongyuan Electric

Power Construction Supervision Co.Ltd., Nanjing 210024,China; 3. Jiangsu Yiding Power Technology Co.Ltd.,

Suqian 223800, China; 4. Far East Composite Technology Co.Ltd., Yixing 214257, China)

Abstract: The common characteristics, respective physical property and mechanical property of this material including carbon fiber, glass fiber and epoxy resin hardener are analyzed in the paper. Besides, the production process and structure of composite core wire are studied. Based on the operation characteristics of power transmission line, through survey, analysis and experiments, it is proposed that the compressed type power fittings are not suitable for carbon fiber composite wires in power transmission project just in case for the wire fracture accidents. In order to ensure the safety of carbon fiber composite core line, the wedge type power fittings can only be applied.

Key words: carbon fiber; composite core; wire; compression; power fittings; analysis

广 告 索 引

江苏省电力设计院	封面	《江苏电机工程》协办单位	前插 4、5
南京远能电力工程有限公司	封二	宿迁电力设计院有限公司	(黑白) 文前 1
江苏南瑞淮胜电缆有限公司	前插 1	江苏南瑞帕威尔电气有限公司	封三
《江苏电机工程》协办单位	前插 2、3	南京南瑞集团有限公司	封底