

# 配网 10kV 电缆主绝缘层反应力锥成型处理自动化设备研制设计方案

江翰锋<sup>1</sup> 傅伟聪<sup>2</sup> 江思杰<sup>3</sup> 周宗波<sup>4</sup> 童榕熙<sup>5</sup>

(国网福建省电力有限公司龙岩供电公司 福建龙岩 364000)

摘要: 本文通过分析 10kV 电缆主绝缘层的材料特性、厚度、同心圆度、倒角斜度等参数变化, 研究反应力锥成型过程中的工艺要求, 开发了一套通用化的反应力锥成型算法, 提供可了一整套以代替人工操作的一种电缆主绝缘层反应力锥成型处理自动化设备。为实现城市配电网电缆化提供了技术支持。

关键词: 配网 10kV; 电缆; 反应力锥; 自动化设备

Development and design scheme of automation equipment for reaction cone forming of main insulation layer of 10kV cable

Hanfeng Jiang<sup>1</sup> Weicong Fu<sup>2</sup> Shijie Jiang<sup>3</sup> Zongbo Zhou<sup>4</sup> Rongxi Tong<sup>5</sup>

State Grid Fujian Electric Power Co., LTD. Longyan Power Supply Company, Fujian Longyan 364000

Abstract: In this paper, through the analysis of 10kV main insulation cable material characteristics, thickness, concentric circle, inverted slope parameters, study the process requirements in the process, developed a set of universal reaction cone forming algorithm, provides a set of manual operation of a cable main insulation reaction cone forming processing automation equipment. It provides technical support for realizing the cabling of urban distribution network.

Key words: distribution network, 10kV; cable; reaction force cone; automation equipment

## 一、研究背景

目前,我国许多城市在 10kV 中压配电网中仍采用架空线路的形式,该形式电力网不仅无法保证安全性,同时也会影响城市美观程度。因此,为了满足城市对电力不断提高的需求,越来越多的学者开始研究 10kV 配电网线路的电缆化。

因现阶段技术原因,无接头电缆目前最大长度只能达到 10km。为满足电缆施工的长度需求,电缆需要采用中间接头制作工艺对两段电缆进行接续加工。电缆中间接头过程中,反应力锥的制作相对困难且考验作业人员施工工艺。因此设计一种简单、高效、切削质量高且能够降低人为因素影响的电缆主绝缘层反应力锥成型处理自动化设备的重要性不言而喻。

## 二、配网 10kV 电缆主绝缘层反应力锥处理工艺研究

该步骤通过分析 10kV 电缆主绝缘层的材料特性、厚度、同心圆度、倒角斜度等参数变化,研究反应力锥成型过程中的工艺要求和最佳端面形状参数,提出一种自动化成型的端面处理方法。具体包括以下几步:

### (一) 电缆接头制作工艺分析

按照电缆中间接头工艺标准。按照如下流程进行制作:首先开箱,检查实物的数量和质量,在确保配件设备齐全无损坏后调直电缆,剥除电缆的外护层及铠装后,从断口剥取 20mm 的内护层,在中心点处锯断芯线。然后剥除屏蔽层及半导体层。在中心两侧的套入应力管并加热固定,套入管材。

接下来,在芯线端部量取二分之一接管长度加 5mm 切除线芯绝缘体,由线芯绝缘断口量取绝缘体 35mm、削成 30mm 长的锥体并使用压接工具将接管压接在电缆芯线上,使两电缆连接起来。为了使接管保持平滑,使用砂纸摩擦接管断面然后接管上缠绕导电带,包住接管,搭接两端,并在两端反应力锥加入一定厚度的填充胶。然后拉出内绝缘管,套在应力管之间,并加热固定。并以此方法固定外绝缘管和半导电管。

固定完毕后,拉出屏蔽网,用铜丝紧紧捆住屏蔽层,并焊牢。然后用地线旋转紧紧捆扎住芯线后,用铜丝捆扎铠装并焊牢后。扣接电缆的铁皮护套,安装好护套筒和电缆外护套,(长度各 1cm),并用火焰加热固定。

最后,将电缆送至相关部门进行送电试验。验收标准为送电空载运行 24 小时,确定无异常即试验合格。提交详细的送电试验报告和结果,相关数据资料,产品合格证等手续给相关单位使用。这段不需要,主要分析反应力锥这个步骤时的操作难度、技术缺陷、影响因素等

### (二) 主绝缘材料的物理化学特性分析

绝缘层(主绝缘)是电缆的重要组成部分之一,在电缆的使用过程中,由于可能出现各种设备故障、外来雷电冲击等异常状况,故该材料需要承受高电压。因此主绝缘材料决定了电缆的质量。目前电缆的主绝缘材料普遍采用交联聚乙烯,其颜色为青白色,材质硬度适中,机械性能高,易于使用各种方式进行加工处理。并且具有耐热的特性,经测试

能够长时间在 90℃ 温度下正常运行。化学性质稳定,不会因潮湿或高温发生变质。绝缘电阻和强度较高,不易被电场击穿。本设计通过采用过氧化物交联的方法改变该材料的分子结构,提高了电缆的工作的温度和载流能力。综上所述,使用交联聚乙烯的电缆具有良好的实用性,主要优点如下:

1. 耐热性能优秀。通过分子结构的改变,使电缆的耐热性和寿命得到进一步的提高。可最高保证在 300℃ 的温度下不会分解碳化。长期在 90℃ 的环境下工作,使用寿命也可达 40 年。

2. 绝缘电阻大;通过分子结构的改变,进一步增大了材料的绝缘电阻,并且电阻的数值受温度影响很小。

3. 机械特性强;通过分子结构的改变,加入了新的化学键,使材料的硬度、抗冲击磨损的能力得到了进一步的提高。有效的弥补了 PE 材料强度低,受到一定外力容易发生龟裂的不足。

### (三) 反应力锥切削工艺分析

通过计算,确定电缆切削起始位置和反应力锥长度,并根据切削直径,确定设备中使用刀具的数量和切削速度。具体如下:

#### 1. 电缆切削起始位置的确定

从切削反应力锥工艺中可知,反应力锥切削的起始位置与在芯线端部的连接管的长度有关。通过查找 GB14315-93 电力电缆导体用压接型铜、铝接线端子和接管,其适用 35kV 及其以下电力电缆。反应力锥切削的起始位置可根据上述表中连接管的材料及长度进行计算后得出。

#### 2. 反应力锥长度的确定

在确定了切削起始位置后,接下来就是确定切削的长度。反应力锥长度可按下式计算:

$$L_c = U \ln(r_i / r_c) / E_t \ln(r_n / r_c)$$

式中:  $r_i$  —— 电缆绝缘半径

$r_n$  —— 增绕绝缘半径

$r_c$  —— 线芯半径

式中 U 是电缆接头的设计电压,其值为 1.1 倍的工频试验电压,参照美国 IEEEStd 标准。当 U 为设计电压时,对于自粘绕带电缆接头,取  $E_t = 0.3 \sim 1kV/mm$ 。

#### 3. 切削直径确定及其设计要求

不同规格的电缆,导体直径不同,其单根电缆外径为导体直径、绝缘层厚度、导体屏蔽、绝缘屏蔽的共同厚度。

前文提到 10kV 电缆绝缘层厚度一致为 4.5mm,故此成型装置设计刀具形状可不用改变,刀具位置需要可以前后调节,以适应不同规格的电缆。

#### 4 成型装置使用刀具数量确定

此次设计采用三组刀具同时切削的模式进行。主要原因是这种模式能够保证同心度,从而有效保证切削件的精度,其次,三组刀具同时切削,理论上单个刀具的切削力由三个刀具分担,能够有效降低电机功率。而且三组刀具分别在圆周上均匀,使电缆在切削过程中受力均匀,不会左右摇摆,保证了切削的稳定性。

#### 5. 切削速度的确定

在确定切削反应力锥速时,需要考虑以下两个问题:

一是需要考虑电缆的各方面因素。刀具在进行高速切削运动时,与被切削物的摩擦会产生大量的热,当达到一定温度时,容易融化电缆的主绝缘材料发生粘连现象,使反应力锥的制作失败。

在主绝缘材料方面,如上文介绍,目前 10kV 电缆主绝缘材料主要为交联聚乙烯,这种材料易于加工,强度高,耐热性强,化学性质稳定,抗冲击力强,能够保证 300℃ 下不变质或碳化,基本能够满足设备的正常运作。

二是在设备运行方面,由于设备制作时零件尺寸和装配的误差以及设备本身外形结构的原因,在告诉切削时会产生不平衡的离心力,导致设备本身的摆动,使反应力锥的制作失败。

### 三、配网 10kV 电缆主绝缘层反应力锥形状及其成型算法研究

近年来数控加工手段的不断丰富和对刀具轨迹生成算法的研究让从计算得到的倒角形状自动生成成型算法成为可能,本节对配网 10kV 电缆主绝缘层反应力锥形状及其成型算法进行研究。

#### (一) 反应力锥形状推导

首先查阅相关材料,得知反应力锥曲面的参数曲线为:

$$x = \frac{U_0}{E_t} \frac{\ln \frac{y}{r_c}}{\ln py^q}$$

根据以上参数曲线,使用 1 或 2 根直线去近似反应力锥曲线进行操作。根据以上参数曲线,应力锥切向场强一般取电缆径向场强的 1/10~1/20 左右,而反应力锥的切向场强一般取应力锥轴向场强的 50%~90% 左右。

#### (二) 反应力锥优化辅助设计

传统计算应力锥锥面的曲线形状及应力锥轴向长度的方法只能存在很多弊端,比如无法了解应力锥内部电场的分布情况,更无法对内部电场的分布进行调整改善。现在由于信息技术的发展,计算机功能的不断加强,在电磁场领域普遍使用有限元的计算方法,该方法先将处理对象划分成若干单元,再根据标量电势求解一定边界和初始条件下每个节点处的电势,继而进一步求解其他相关量,从而了解每个划分单元的电场分布,根据计算结果可以通过调整应力锥来改善其内部电场分布。

本文使用有限元的方法,根据运算结果调整应力锥的电场分布,优化已有的应力锥曲线,根据计算结果,并考虑外绝缘表面的场强,加工难以程度等因素,取应力锥长度为 1.3cm,合适的端部曲率选 0.2cm 为最优结果。

#### (三) 反应力锥成型方法研究

经过项目成员的反复研究,总结出反应力锥自动化的成型方法目前有两种,一种是类似数控车床路径规划的方法,另一种是成型刀成型方法。

##### 1. 类似数控车床路径规划的方法:

夹持系统在电缆两端做固定,避免电缆在剥切反应力锥时的移动,防止电缆横向位移,保证反应力锥成型质量。通过控制电机驱动器,间接实现对刀具的进给量的控制,剥切出不同形状的反应力锥,也就是说通过程序控制刀具切削路径,因为刀具是旋转的,从而得到理想的反应力锥曲面。

##### 2. 成型刀成型方法

此方法成型刀为特制的,刀具刀锋曲线为反应力锥曲面的投影曲线,当传动机构带着刀具旋转时,只需要向前进给就可以使电缆上形成反应力锥曲面。如果按照路径规划的方法,设备结构相对复杂,体积也比较大,刀具切削路径程序稳定性较差;而成型刀成型方法,由于刀具为特制的,故装置结构比较简单,体积也比较小巧,便于携带,更适合单人外出作业,与本项目的要求更加贴合,故此次使用成型刀成型方法进行设计。

### 四、应力锥切削装置组成及其工作原理

通过以上研究设计的反应力锥切削装置采用直流供电,主要由电缆固定模块、刀具进给模块、传动模块和电机及供电模块构成。本章对各模块进行了设计,并说明了装置的原理和使用方法,最后通过计算对刀具的强度和刚度进行了测试。

#### (一) 刀具进给模块设计

本项目设计应力锥切削装置是在三芯电缆的基础上对单根电缆进行应力锥的切削,当盘丝旋转一周后,三个刀架在盘梯工字槽内沿半径方向的位移量应恰好等于盘丝曲线(螺旋线)的螺距。而刀架牙弧为刀具分布,则不在任何位置都可以与盘丝牙保持啮合,切保证牙爪上位于盘丝个牙弧都能与盘丝平面螺旋各全同时啮合,故盘丝平面螺旋的螺距必须保持等值(要求盘丝曲线的等距性)。通过参考相关资料,平面螺纹螺距  $S=6$ , 经计算得大弧半径为 48mm, 小弧半径为 25mm。

#### (二) 电缆固定模块设计

此模块由多个零件组成。在装置中增加可更换套筒,与传动系统及刀具移动平台等多个零件配合,留出足够的长度,以保证切削时电缆的稳定性。可更换套筒外壁与轴承、刀具移动平台、轴承固定垫片等多个零件配合,内壁的尺寸则是由不同规格电缆外径控制。这样,使用时每种电缆对应一种规格的套筒,装置在使用时也可以达到简单、方便、快捷、高效的目的。

#### (三) 切削刀具设计

考虑到切削材料为交联聚乙烯,其具有良好的可加工性,硬度不高,且具有一定的弹性,故此次我们选用的刀具材料需要一定的硬度,并韧性要足够的好,故此次选用刀具材料为 65Mn。刀具切削的角度此次设计为 30°, 以上结果是综合考虑交联聚乙烯的材料特制以及机械性能决定的。

#### (四) 装置工作原理及使用方法

本次设计反应力锥切削装置主要由传动系统、电缆固定模块、刀具进给模块以及成型动力刀头模块等组成,通过可更换套筒,可实现对不同规格 10kV 电缆进行快速、高效、便捷的切削工作。本次设计采用同步带轮的传动方式,由电机带动小带轮,通过同步带传动,带动大带轮进行旋转运动。其中,大小带轮的传动比为 14:80。

刀具进给模块进给机构主要由平面螺纹控制,此模块调节主要通过手动控制,通过手动旋转续小齿轮,带动平面螺纹零件外部的齿轮,从而实现平面螺纹的旋转,用以调节刀架的前后进给,而刀具固定在刀架上,自然也一起随着刀架前后一起运动。

#### (五) 反应力锥切削过程的分析及研究

通过运用有限元的方法对反应力锥切削过程进行运算,其结果如下:

1. 最大应力出现在刀尖点附近,其应力值为 3.940e+05MPa,远小于刀具材料的抗弯强度,所以刀具的强度合乎要求;

2. 刀具最大综合变形量为 9.358e-06mm, 根据一般设计规范,刀头切削刃的径向跳动不大于 0.03mm,轴向跳动不大于 0.02mm 可知,刀具的刚度要求满足实际要求。

### 五、结论

为顺利实现配电网的线路电缆化,本文从 10kV 电缆主绝缘层反应力锥处理工艺、反应力形状及其成型算法与应力锥切削装置组成及其工作原理三个方面着手分析,研制了配网 10kV 电缆导体自动压接与检测一体化设备。下一步,我们将以“国网福建省电力有限公司科技项目计划任务书”为指导,围绕公司和电网发展的工作重点,组织制定专项研究计划,统筹利用公司系统资金,选择试点,组织研发,统一推广,最大限度地减少低水平重复开发,进一步优化提升业务精益化管理水平。

#### 参考文献:

- [1] 王晓建. 电缆主绝缘层反应力锥加工设备[J]. 科技与创新, 2019(2): 5-11.
- [2] 侯振华. 10kV 电缆接头主绝缘反应力锥切削专用工具的改进[J]. 大科技, 2019(1): 18-20.
- [3] 胡倩楠. 配网 10kV 电缆主绝缘层反应力锥成型方法研究[J]. 建筑电气, 2020(3): 22-25.

该论文由国网福建省电力有限公司科技项目资助(省公司科技项目,项目编号: 5213601900WU)

作者简介: 第一作者: 江翰锋性别: 男民族: 汉族出生年月: 1987年6月籍贯: 福建永定毕业院校: 华北电力大学学历: 本科, 职称: 工程师, 研究方向: 配电检修