

略谈高压电缆附件的制造工艺

胡斌 刘晓成 杨国忠

杭州富通电工有限公司 浙江杭州 310018

【摘要】高压电缆附件是保证电缆输电安全可靠的关键部件。本文从绝缘材料、导电材料、密封材料等高压电缆附件的主要材料特性与选择入手，分析了应力锥、屏蔽层等关键结构的设计原则与优化方法，概述了导电件加工、橡胶件制造、注射成型、装配固化等主要工艺流程，并探讨了材料配方改性、先进设计制造、检测试验创新等方面的研究进展，以期为高压电缆附件的性能提升与可靠性改进提供参考。

【关键词】高压电缆附件；绝缘材料；结构设计；制造工艺；优化创新

Briefly talk about the manufacturing process of high voltage cable accessories

Hu Bin Liu Xiaocheng Yang Guozhong

Hangzhou Futong Electric Co., LTD Hangzhou, Zhejiang Province 310018

【Abstract】High-voltage cable accessories are critical components that ensure the safe and reliable transmission of electricity. This paper starts with an analysis of the main material properties and selection criteria for high-voltage cable accessories, including insulating materials, conductive materials, and sealing materials. It then examines the design principles and optimization methods for key structures such as stress cones and shielding layers. The paper provides an overview of major process flows, including the processing of conductive parts, manufacturing of rubber components, injection molding, and assembly curing. Additionally, it explores research advancements in material formulation modification, advanced design and manufacturing, and innovative testing and experimentation, aiming to offer a reference for improving the performance and reliability of high-voltage cable accessories.

【Key words】high voltage cable accessories; insulation materials; structural design; manufacturing process; optimization and innovation

引言：

高压电缆附件是电缆与电缆、电缆与电气设备连接时的关键部件，对整个输电线路的安全可靠运行至关重要。高压电缆附件在长期运行过程中受到电、热、力、环境等多重应力的共同作用，易发生局部过热、放电、击穿等故障，严重影响输电可靠性。随着特高压、柔性直流输电等新型输电技术的快速发展，对高压电缆附件的性能要求越来越高，传统的设计和制造工艺面临诸多挑战。

1、高压电缆附件的主要材料

1.1 绝缘材料的选择与配方

高压电缆附件绝缘材料的选择是保证其安全可靠运行的关键。常用的绝缘材料主要包括交联聚乙烯、乙丙橡胶和硅橡胶等。其中，交联聚乙烯具有优异的电气绝缘性能和机械强度，但耐热性相对较差；乙丙橡胶具有良好的耐热性和耐老化性能，但电气性能略逊于交联聚乙烯；硅橡胶则兼具优异的电气绝缘性能、耐热性和耐老化性能，但成本相对较高。在实际应用中，需要综合考虑各种材料的性能特点和经济性，合理选择和优化配方，以满足高压电缆附件的使用要求。

1.2 导电材料的选择与性能要求

高压电缆附件导电材料的选择对其导电性能和机械强度有着重要影响。常用的导电材料主要包括铜和铝。铜具有优异的导电性和机械强度，但密度大、成本高；铝导电性能略逊于铜，但密度小、成本低，在满足导电要求的前提下可以有效减轻电缆附件的重量和成本。在选择导电材料时，需要综合考虑导电性能、机械强度、重量、成本等因素，并对材料进行合理的加工和表面处理，如退火、电镀等，以提高其导电性能和抗氧化性能，确保高压电缆附件的可靠运行。

1.3 密封材料的选择与性能优化

常用的密封材料主要包括硅橡胶、丁腈橡胶等。其中，硅橡胶具有优异的耐热性、耐老化性和电气绝缘性能，但机械强度相对较低；丁腈橡胶具有良好的机械强度和耐油性，但耐热性相对较差。在实际应用中，需要根据电缆附件的使用环境和要求，合理选择密封材料，并通过添加填料、交联等方式对材料进行改性和性能优化，提高其密封性能和长期可靠性。还需要优化密封结构设计，如采用多级密封、迷宫密封等，以进一步提高电缆附件的密封可靠性。

1.4 高分子材料的改性与应用

高分子材料在高压电缆附件中的应用十分广泛，通过对高分子材料进行改性，可以显著提升其性能，满足日益苛刻的使用要求。常见的改性方法包括填料改性、共聚改性、交

联改性等。例如,通过添加纳米填料,可以提高材料的机械强度、耐热性和电气绝缘性能;通过共聚改性,可以兼顾不同单体的优点,获得性能更加平衡的材料;通过辐射交联、化学交联等方式,可以显著提高材料的机械强度、耐热性和耐老化性能^[1]。合理运用这些改性技术,可以开发出性能优异、满足特定应用需求的高分子材料,为高压电缆附件的安全高效运行提供材料支撑。

2、高压电缆附件的设计与结构

2.1 设计原则与设计流程

高压电缆附件设计是一项系统工程,需要遵循安全可靠、经济合理、便于制造和安装等原则。设计流程通常包括确定设计输入、方案设计、结构优化、材料选择、工艺评估、原型试制和性能验证等环节。在设计过程中,需要综合考虑电气、机械、热学和环境等多重因素,并通过仿真分析和试验验证不断优化设计,以确保电缆附件的各项性能指标满足使用要求。还需要与制造、安装等环节紧密协作,确保设计的可行性和经济性。

2.2 应力锥设计与优化

应力锥是高压电缆附件中的关键结构,其设计的合理性直接影响到电缆附件的电场分布和绝缘性能。应力锥的主要作用是均匀电缆端部的电场分布,避免应力集中引起的局部放电和绝缘击穿。在设计应力锥时,需要综合考虑锥体材料、锥角、长度等参数,通过理论计算和仿真分析优化其结构尺寸,使电场分布尽可能均匀。还需要考虑应力锥与电缆绝缘层、主绝缘之间的界面问题,采取合适的界面控制措施,如使用应力控制层、屏蔽层等,以进一步改善电场分布,提高电缆附件的绝缘可靠性。

2.3 屏蔽结构设计

屏蔽结构是高压电缆附件中的另一个重要组成部分,其主要作用是降低附件外壳表面的电场强度,防止电晕放电引起的绝缘老化和损坏。屏蔽结构通常采用金属材料,如铜网、铜箔等,通过合理设计其形状和尺寸,使附件表面电场分布更加均匀。在设计屏蔽结构时,需要考虑屏蔽材料的导电性能、厚度、网格大小等参数,并通过仿真分析优化其结构布置,使屏蔽效果达到最佳。同时,还需要注意屏蔽层与主绝缘、外半导体层之间的界面处理,避免界面处电场畸变和绝缘缺陷,确保屏蔽结构的有效性和可靠性。

2.4 外壳与密封结构设计

外壳和密封结构是保证高压电缆附件机械强度和防水密封性能的关键部件。外壳材料通常选用高强度、耐腐蚀的金属或复合材料,通过合理设计其形状和厚度,确保在各种载荷下具有足够的机械强度和稳定性。密封结构的设计需要考虑电缆与附件的界面形式、环境条件等因素,采用可靠的密封方式,如O型圈密封、压缩密封等,并合理设计密封面的形状和尺寸,确保在各种工况下都能保持良好的密封性

能^[2]。还需要考虑外壳和密封结构的装配工艺,便于制造和安装,提高电缆附件的生产效率和可靠性。

2.5 结构仿真分析与优化

通过建立电缆附件的三维实体模型,采用有限元分析等数值计算方法,可以准确地模拟电缆附件在各种工况下的电场、温度场、机械应力等分布情况,及早发现设计中的潜在问题。在仿真分析的基础上,可以采用参数化设计、拓扑优化等技术对电缆附件结构进行优化,如优化应力锥的形状、屏蔽层的布置等,以改善电场分布、降低应力水平、减小局部放电等,提高电缆附件的性能和可靠性。同时,结构仿真还可以指导电缆附件的试验设计,减少试制次数,缩短开发周期,降低设计成本。

3、高压电缆附件的制造工艺流程

3.1 工艺流程概述

高压电缆附件的制造工艺流程是将设计方案转化为合格产品的关键环节,其合理性和可靠性直接影响到电缆附件的性能和质量。制造工艺流程通常包括导电件加工、绝缘件制造、注射成型、装配固化等主要环节,每个环节又包含多道工序,需要严格控制工艺参数和质量要求。在实际生产中,需要根据电缆附件的结构特点和材料属性,合理选择和优化工艺路线,同时引入自动化、信息化等先进制造技术,提高生产效率和产品一致性。此外,还需要建立完善的质量管理体系,对关键工艺过程进行监控和验证,确保电缆附件制造的可靠性和稳定性。

3.2 导电件加工工艺

导电件是高压电缆附件中传输电流的关键部件,其加工工艺的优劣直接影响到电缆附件的导电性能和机械强度。导电件材料主要包括铜和铝,其中铜导电件加工通常采用车削、铣削、钻孔等机械加工方法,而铝导电件则需要考虑其导电性能和成型性,采用挤压、锻造等塑性加工方法。在加工过程中,需要严格控制尺寸公差、表面粗糙度等参数,并采取退火、电镀等表面处理措施,提高导电件的导电性能和耐腐蚀性。同时,还需要进行无损检测,如射线探伤、涡流检测等,以保证导电件的内在质量和可靠性。

3.3 橡胶件制造工艺

橡胶件是高压电缆附件中的重要绝缘和密封部件,其制造工艺对电缆附件的电气性能和使用寿命有着至关重要的影响。橡胶件制造通常包括混炼、挤出、硫化等工序,其中混炼是将生胶、填料、助剂等原材料按照配方要求均匀混合,并使其具有适宜的加工性能;挤出是将混炼胶料通过挤出机头模具挤压成型,赋予橡胶件以所需的形状和尺寸;硫化则是在高温高压下使橡胶分子交联,形成具有弹性的三维网状结构^[3]。在橡胶件制造过程中,需要严格控制配方、温度、压力等工艺参数,确保橡胶件的均匀性和稳定性,还需要进行硫化特性、力学性能等检测,以保证其性能满足使用要求。

3.4 注射成型工艺

注射成型过程包括材料熔融、注射、保压、冷却等环节,需要综合考虑材料特性、产品结构、模具设计等因素,合理设定注射温度、压力、速度等工艺参数,确保熔体充填均匀、固化成型良好。同时,注射成型对模具的设计和制造提出了较高要求,需要考虑浇口、流道、冷却系统等因素,优化模具结构,提高成型质量和效率。在实际生产中,还需要采用计算机数值模拟等技术对注射成型过程进行优化,并建立完善的过程监控和质量检测体系,及时发现和解决生产问题,保证注射件的稳定性和一致性。

3.5 装配与固化工艺

装配过程需要按照规定的顺序和要求,将导电件、绝缘件、屏蔽层、密封件等部件精确定位和可靠连接,确保各部件之间的配合和绝缘性能。在装配过程中,需要采用专用工装夹具,引入自动化设备,提高装配精度和效率。固化是将附件整体置于特定的温度和压力条件下,使绝缘材料彻底交联固化,赋予其优异的电气和机械性能。固化工艺需要严格控制温度、压力、时间等参数,确保绝缘材料固化均匀、界面结合良好。此外,还需要对固化过程进行实时监测和优化控制,确保固化质量的稳定性和一致性。

4、高压电缆附件制造工艺的创新与优化

4.1 材料配方与改性的研究进展

近年来,随着材料科学的不断发展,各种新型绝缘材料、导电材料、功能填料等不断涌现,为电缆附件材料的优化提供了更多可能。例如,采用纳米复合材料可以显著提高绝缘材料的电气强度和热导率;引入自修复功能可以延长材料的使用寿命;优化材料的界面结构可以改善应力分布,降低局部放电风险。除此,材料改性技术如辐射交联、化学改性等也在不断创新,可以针对性地改善材料的某些性能,满足电缆附件的特定要求。

4.2 设计方法与结构优化的新思路

传统的经验设计方法已难以满足日益苛刻的使用要求,需要引入现代设计理念和优化技术。例如,采用多物理场耦合分析可以更准确地评估电缆附件在实际工况下的受力情况;应用拓扑优化、参数化设计等方法可以在满足性能要求

的同时,最大限度地减小体积、降低成本;引入轻量化设计理念可以优化附件结构,减轻重量,便于安装和运输。同时,设计过程中还需要充分考虑生产工艺、安装维护等因素,采用一体化设计、模块化设计等思路,提高电缆附件的生产效率和使用便捷性。

4.3 先进制造工艺与装备的应用

先进制造工艺与装备的应用是实现高压电缆附件高品质高效生产的关键举措。传统的手工作业、半自动化生产已难以适应日益增长的市场需求,亟须引入自动化、智能化制造技术。数字化设计与仿真、精密加工、柔性组装等先进工艺可以显著提高生产效率和产品质量;机器人、自动化生产线等智能装备可以降低人工成本,提高生产的灵活性和一致性;在线检测、智能仓储等信息化系统可以实现生产过程的实时监控和优化调度,确保产品质量的可追溯性。同时,还需要加强工艺装备的集成创新,打造柔性、敏捷的制造体系,快速响应市场变化^[4]。

4.4 检测试验方法的改进与创新

传统的型式试验、例行试验等方法需要与时俱进,引入新的测试手段和评价指标。例如,采用局部放电检测、红外热成像等无损检测技术,可以及早发现绝缘缺陷,评估其健康状态;开展多应力综合试验,模拟电缆附件的实际工作状态,考核其在极限条件下的性能表现;引入大数据分析、人工智能等信息技术,对海量试验数据进行挖掘和建模,构建性能评估和寿命预测模型^[5]。同时,还需要加强试验方法的标准化、规范化工作,建立完善的检测评价体系,为电缆附件的质量提供可靠保障。

结束语:

高压电缆附件技术的发展和创新的是一项复杂的系统工程,涉及材料、机械、电气、工艺等多学科交叉融合。未来,随着新材料、新工艺、新装备等技术的不断突破,高压电缆附件的性能和可靠性将进一步提升。同时,还需要加强基础研究与应用工程的紧密结合,建立完善的技术标准和规范体系,推动高压电缆附件技术的标准化、系列化发展,为构建安全高效、绿色低碳的现代电网提供坚实保障。

参考文献

- [1]刘港.K 公司电缆附件产品海外客户忠诚度提升研究[D].上海外国语大学, 2023.
- [2]薛涛.10kV 电缆附件绝缘和热扩散特性研究[D].华北电力大学(北京), 2023.
- [3]韩冲.多物理场下高压直流电缆附件用 SiC/硅橡胶非线性材料介电性能研究[D].天津大学, 2021.
- [4]王家兴.高压直流电缆附件绝缘特性分析及电-热耦合场仿真研究[D].青岛科技大学, 2021.
- [5]贾冬.基于有限元分析的高压直流电缆附件电场分布的研究[D].哈尔滨理工大学, 2020.