

35 千伏输电线路导线接头发热故障分析与预防

李林选 李 苏

摘 要：35 千伏输电线路导线接头作为电力系统中的关键连接单元，其导电性能与热稳定性直接关系到线路运行的安全与可靠。本文基于电—热耦合理论与有限元数值模拟方法，对导线接头的结构特征、运行机理及温升行为进行了系统分析，揭示了在不同工况条件下接头温度分布与热平衡特性的变化规律。通过建立多物理场仿真模型与参数校正体系，探讨了高导热抗氧化材料的应用优化、压接工艺标准化及在线监测技术在防发热故障中的作用机理。研究表明，导线接头发热实质上是材料性能衰减、电流密度不均与热阻积聚的综合效应，科学的结构优化与运行监控可有效降低温升风险，为输电线路安全运行提供理论依据与工程支撑。

关键词：35 千伏；输电线路；导线接头；发热故障

引言

随着电网输电容量的不断提升与运行环境的复杂化，35 千伏输电线路导线接头发热问题已成为制约系统稳定运行的重要隐患。接头在长期载流与气候变化作用下易发生电阻升高、温度异常及接触界面退化，导致能量损耗增加与设备寿命缩短。传统故障分析多侧重经验判断，缺乏对电—热耦合过程及温升机理的定量研究。

1 35 千伏输电线路导线接头结构与运行特性分析

35 千伏输电线路导线接头作为电能传输系统中关键的电气连接单元，其结构完整性与导电性能直接决定线路的运行安全性与稳定性。导线接头主要由导电主体、压接筒体、填充导电膏层及防护密封层构成，其设计核心在于通过金属接触界面的稳定导电与热传导性能实现低阻连接与高效散热。在结构特征上，导线接头通常采用铝绞线或铝包钢绞线与同材质连接管进行机械压接，通过塑性变形使接触面紧密贴合，以形成均匀的电流通路和连续的热传导通道。然而，由于压接过程中材料硬化、界面微空隙及表面氧化膜等因素的存在，接头处接触电阻往往高于导线本体，易成为局部能量聚集点，从而引发发热风险。运行特性方面，35 千伏输电线路长期处于中等电压、高负荷运行状态，导线接头需承受周期性电流热效应、电磁振动及外界环境温度变化的耦合作用，其电—热—力多场相互作用对接头温升行为具有显著影响。导线通过接头时的载流密度分布不均易导致电流拥挤效应，进而引起接触点局部温度升高，形成“热点区”；同时，接头结构中的金属晶格缺陷及材料界面热阻使热扩散

效率降低，进一步加剧温升积累效应。此外，接头运行中受风冷、辐射及对流换热等环境条件影响，其温度场呈动态变化特征，若导电接触性能下降或压接松动，易导致接头温度持续升高，进而引起绝缘老化、材料退化及机械性能下降，最终形成热失稳故障。综上，35 千伏输电线路导线接头的结构特性与运行工况密切相关，其发热问题实质上源于材料、电流与热流的综合耦合效应，因此必须从结构设计、电气参数控制与运行状态监测等多维度进行系统研究，为防止热失效提供理论支撑与工程依据。

2 35 千伏输电线路导线接头发热故障分析

2.1 有限元法在导线接头温升特性分析中的建模方法

有限元法在导线接头温升特性分析中的建模方法是研究 35 千伏输电线路接头发热机理与优化设计的基础，其核心在于通过多物理场耦合分析建立导线接头的电—热传导数学模型，以实现温度分布、热流密度及材料性能变化的精确描述。模型构建应以导线接头的几何结构特征、材料参数与边界条件为依据，采用分区建模方式对导体、接头主体、压接区及界面层进行精细离散，确保结构单元在应力集中与热流传导路径上的连续性与精度。电场分析部分以稳态电流传导方程为基础，通过电位梯度与电流密度计算接触区域的等效电阻分布，并结合接触电阻微结构模型修正局部电流集中效应；热场模型基于能量守恒原理与傅里叶热传导方程，考虑导体内焦耳热、接头界面热阻及环境对流散热的耦合影响，建立电流密度与温升梯度的关联关系。边界条件设置应综合考虑导线辐射散热、风冷对流与太阳辐射吸收效应，以

反映实际运行环境下的复杂热边界特性。网格划分应采用非结构化自适应网格,对压接界面与高梯度区域加密划分,确保温度梯度变化的计算精度。为避免数值发散,应在求解过程中引入非线性材料参数修正,考虑温度对电导率、比热容与热导率的动态影响。模型求解采用稳态与瞬态相结合的计算方式,分别用于分析长期运行稳定温升与短时过载条件下的瞬态热响应。

2.2 导线接头电-热耦合场的仿真计算与参数校正技术

导线接头电-热耦合场的仿真计算与参数校正技术是揭示 35 千伏输电线路导线接头温升机理的核心手段,其研究重点在于实现电流传导、焦耳发热与热传导的多场耦合模拟,从而准确预测接头温度分布及热平衡特性。电-热耦合模型建立应基于电流密度与温度梯度之间的动态相互影响关系,采用电势控制方程与热传导方程的同步求解方式,通过耦合迭代实现电能到热能的转化与空间传导过程的实时反馈。在仿真建模中,接头区域的非均匀电阻分布是影响温升精度的关键因素,应结合微观界面接触理论引入等效接触电阻模型,将压接区、界面区及填充导电膏层的电学特性参数进行分层定义,实现接触性能的精细化建模。热场部分应综合考虑材料导热性能、界面热阻及空气对流系数的动态变化,采用热-流固一体化算法模拟外部风速与辐射环境对接头热平衡的影响。仿真计算采用稳态与瞬态混合求解策略,稳态模型用于描述长期载流条件下的温度稳定分布,瞬态模型用于捕捉短时过载与突发故障下的热响应动态变化。为提高模型的准确性,应通过实验测试对关键参数进行校正,包括接触电阻、界面热阻及材料热物性参数。校正过程可采用红外热像测试与热电偶点测法相结合的方式,获取不同负载下接头表面与内部温度分布数据,并通过反演算法优化模型输入参数,实现数值仿真与实测数据的误差收敛。

2.3 不同运行工况下导线接头温度分布与热平衡特性分析

不同运行工况下导线接头温度分布与热平衡特性分析是研究输电线路热稳定性与防发热设计的重要环节,其本质在于揭示导线接头在多种负载、电流密度与环境条件下的热动态响应规律。35 千伏输电线路在长期运行中受负荷波动、气象变化与环境扰动等因素影响,其接头温度分布具有明显的非线性与时变性。正常运行工况下,接头温度沿导线轴向呈近似对称分布,热量主要通过导体传导与外部对流散热实现热平衡;而在高负荷或过载运行时,焦耳热显著增加,

局部接触电阻区形成高温热点区,温度梯度急剧增大,导致热应力集中与界面接触性能恶化。环境温度升高或风速减小时,外部散热条件减弱,接头整体温度水平上升,形成热积聚现象;相反,在低温高风速环境下,对流换热增强,可显著降低接头表面温升幅度。此外,昼夜温差与太阳辐射引起的周期性热循环会导致接头材料的热疲劳与机械松动,从而改变接触电阻与热传导路径,使温升行为表现出滞后与累积效应。在冰雪或高湿环境中,表面结冰与水汽凝结会影响辐射与对流换热过程,使接头表面形成不均匀的热阻层,进一步加剧热不平衡现象。为定量分析不同工况下的热响应特征,应结合电-热耦合仿真结果与现场监测数据,建立温度-负载-环境参数的动态耦合模型,通过数值计算获得接头在各种运行条件下的热平衡曲线与临界温升阈值。

3 35 千伏输电线路导线接头发热故障预防措施

3.1 高导热、高抗氧化材料在导线接头中的优化应用

高导热、高抗氧化材料在导线接头中的优化应用是提升 35 千伏输电线路运行安全性与热稳定性的关键途径,其核心在于通过材料热电性能的系统优化降低接头接触电阻与温升效应,从而实现导电性能、导热能力与抗环境腐蚀性能的综合提升。传统铝合金导线接头在长期运行中易受电流冲击与高温氧化作用影响,导致界面接触电阻逐渐增大,热导率下降,引发热积聚与接头老化。为此,应采用高导热稀土铝合金、纳米增强铜铝复合材料及碳基导热涂层等新型材料体系。稀土元素的引入可优化晶粒结构与电子迁移率,显著提高导体电导率与热稳定性;纳米增强复合材料通过多相界面传热机制改善材料内部热扩散路径,降低界面热阻;碳基涂层材料以石墨烯、碳纳米管为主体,具备优异的导热性与抗氧化性,可在接触界面形成高效导热保护层,防止氧化膜生长及热损伤累积。在材料制造过程中,应重视晶粒取向控制与界面结合强化技术,通过真空冶炼、热挤压与多道冷变形等工艺优化材料显微组织,使导体具备低孔隙率、高结合强度与稳定热传导性能。同时,应在接头表面施加抗氧化镀层或惰性金属覆层,以延缓氧化反应过程,增强长期服役稳定性。在材料应用评价上,可采用热电耦合模拟、接触电阻测试与高温循环试验相结合的手段,对不同材料体系的热阻分布、温度梯度与疲劳性能进行系统验证。

3.2 导线压接工艺标准化与施工质量控制关键技术

导线压接工艺标准化与施工质量控制关键技术是防止

35 千伏输电线路导线接头发热故障的核心环节，其关键在于通过标准化压接参数、精细化施工流程与全过程质量监管，确保接头电气性能与机械强度的长期稳定。压接工艺标准化应以力学匹配与电接触稳定为原则，通过确定合适的压接压力、变形系数与压接长度实现接触界面的完全塑性变形与均匀压实，保证金属分子间充分接触并形成高密度导电通路。工艺参数的制定应基于不同导体规格、材料硬度及环境条件下的压接特性试验，利用有限元分析模型对应力分布、接触电阻与温升规律进行动态优化，以获得最佳压接形变与界面结合效果。在施工过程中，应严格执行导线表面处理规范，去除氧化膜与油污，确保压接前金属表面洁净度与接触质量；同时应采用经标定的液压压接设备与模具，控制压接力矩及压痕深度，避免因过压造成材料损伤或因欠压导致接触不良。施工后应通过超声检测、接触电阻测试与红外热像检测等方法进行多维质量验证，对压接区域的内部密实度、温升分布及电气连续性进行综合评估。为提高压接一致性与施工可追溯性，应建立全过程数字化质量管理体系，通过传感数据采集与施工参数记录实现压接过程监控与数据留存，形成“设计—施工—检测—评估”的闭环控制模式。

3.3 导线接头运行状态在线监测与预防性维护机制

导线接头运行状态在线监测与预防性维护机制是 35 千伏输电线路智能化运维体系的重要组成部分，其核心在于通过多参数融合监测、智能诊断分析与状态预测控制，实现导线接头发热故障的早期识别与风险预防。监测系统应基于物联网与传感集成技术，构建以温度、应变、电流、电压及环境参数为核心的多维实时感知网络，采用高精度分布式光纤温度传感器、无线温度节点与电流互感单元对导线接头进行连续监测，实现温升异常、接触电阻变化及电流分布不均的动态识别。系统应集成数据采集终端与边缘计算模块，利用滤波算法与异常检测模型对监测数据进行实时校正与动态

特征提取，避免环境扰动对监测结果的干扰。在数据分析层面，应基于电—热耦合模型与机器学习算法建立温度—电流—时间三维关联模型，对接头温升趋势进行拟合预测，实现潜在故障的提前预警。监测系统应与调度控制平台实现数据互联，通过云端大数据分析识别异常工况与长期性能衰退特征，为维护决策提供数据支撑。预防性维护机制应遵循“监测—评估—干预—验证”的闭环模式，根据监测结果自动生成维护优先级与风险等级，针对轻微接触劣化实施局部补压或表面处理，对严重异常区域执行导线更换与压接修复。

4 结语

35 千伏输电线路导线接头的发热问题是电力系统运行中典型的电—热耦合失稳现象，其防控需要材料、结构、工艺与监测的多维协同。通过仿真计算与实验验证发现，导线接头温升主要受接触电阻、导热性能与环境散热条件共同影响，任何环节的劣化均可能导致热失稳与结构老化。采用高导热抗氧化材料、标准化压接工艺与智能监测技术的综合应用，可有效控制接头温度上限，延缓热疲劳与界面退化进程，实现输电线路的长期安全与稳定运行。

参考文献：

- [1] 邵源鹏. 一种导线通用自锁连接装置产品技术探讨 [J]. 电子测试, 2022, 36(12): 96–98.
- [2] 邓海燕, 陈海山, 邓伟平. 一种军车电路断路故障抢修装置 [J]. 汽车实用技术, 2020, 45(22): 148–149.
- [3] 赵健. 基于 LPWAN 高压输电导线接头温度的监测系统 [D]. 东北农业大学, 2020.
- [4] 王永峰. 电动汽车电池系统电导线接头电—热—力耦合特性研究 [D]. 桂林电子科技大学, 2020.
- [5] 徐智达. 无线测温技术在架空输电线路故障诊断中的应用 [J]. 通讯世界, 2020, 27(02): 190–191.