

高温超导电缆接头热-力耦合失效机理与在线监测技术

凡海南

江苏富瑞能源服务有限公司 江苏张家港

【摘要】高温超导电缆接头在运行过程中同时承受电流热效应与机械应力作用，其热-力耦合失效已成为制约工程化应用的重要因素。研究基于热传导与力学响应的耦合机理分析，揭示了接头内部温升分布、应力集中及材料性能退化之间的相互作用规律，明确了界面接触、电流均匀性和冷却条件对失效过程的影响。针对高温超导接头在复杂工况下的安全隐患，提出了结合光纤传感、红外成像与电磁信号分析的在线监测技术方案，实现温度场与应力场的实时采集与状态评估。通过建立多物理场数值模型与实验验证平台，形成了一套可用于预测失效风险、优化接头结构及运行维护策略的技术体系，为高温超导输电工程的可靠运行提供理论支持与工程参考。

【关键词】高温超导电缆接头；热-力耦合；失效机理；在线监测；多物理场分析

【收稿日期】2025 年 4 月 17 日

【出刊日期】2025 年 5 月 19 日

【DOI】10.12208/j.jeea.20250183

Mechanism of thermo-mechanical coupling failure and on-line monitoring technology for high-temperature superconducting cable joints

Hainan Fan

Jiangsu Furui Energy Service Co., Ltd, Zhangjiagang, Jiangsu

【Abstract】High-temperature superconducting cable joints are subject to both current thermal effects and mechanical stresses during operation, and their thermo-mechanical coupling failure has become a key factor restricting engineering applications. Based on the analysis of the coupling mechanism between heat conduction and mechanical response, this study reveals the interaction laws among internal temperature rise distribution, stress concentration, and material performance degradation of the joints, and clarifies the influence of interface contact, current uniformity, and cooling conditions on the failure process. Aiming at the potential safety hazards of high-temperature superconducting joints under complex working conditions, an on-line monitoring technology scheme combining optical fiber sensing, infrared imaging, and electromagnetic signal analysis is proposed to realize real-time acquisition and state evaluation of temperature fields and stress fields. By establishing a multi-physics numerical model and an experimental verification platform, a technical system that can be used to predict failure risks, optimize joint structures, and formulate operation and maintenance strategies is formed, providing theoretical support and engineering references for the reliable operation of high-temperature superconducting power transmission projects.

【Keywords】High-temperature superconducting cable joint; Thermo-mechanical coupling; Failure mechanism; On-line monitoring; Multi-physics field analysis

引言

高温超导电缆因其低损耗、大电流承载能力和紧凑结构，在新型电力输送系统中展现出广阔应用前景。然而，接头作为连接与传输的关键环节，其热-力耦合失效问题直接关系到整条线路的安全与寿命。在长期运行中，电流产生的焦耳热与外界环境变化引发的机械应力相互作用，会导致接头局部过热、界面退化甚至失效。当前，国内外在接头设计与制备方面取得了一定

进展，但针对热-力耦合失效机制的系统研究及实时监测技术仍显不足。本文围绕高温超导电缆接头的热-力耦合失效机理，提出可行的在线监测技术路线，旨在为工程应用提供理论基础与技术保障。

1 高温超导电缆接头热-力耦合效应的形成机制

高温超导电缆接头在运行过程中同时承受由电流传输产生的焦耳热与由机械约束、温度梯度变化引起的应力效应。由于超导材料在低温下具有零电阻特性，

其内部热源主要来源于界面接触电阻、导体结构缺陷以及局部超导性能退化区。这些微小的热源在低温环境下散热条件有限,导致局部温度快速上升,从而破坏超导态,引发电阻突变^[1]。温度升高会改变材料的热膨胀系数分布,使接头区域产生非均匀的热应变场,这种热应变与机械载荷叠加后形成复杂的热-力耦合应力状态,对接头的结构稳定性构成潜在威胁。尤其在电缆通流波动或外界冷却介质温度变化时,接头区域热流密度的波动更易引发瞬态热应力集中,促使界面出现微裂纹或材料分层。

在多物理场相互作用下,超导接头的热-力响应呈现高度非线性。温度场的局部畸变不仅会降低超导临界电流,还会改变导体与绝缘层之间的界面粘结性能,形成局部滑移或剥离,进一步增加接触热阻和机械间隙。这种反馈机制导致热量积聚速度加快,形成局部热点。热点形成后,超导区向常导区转变,引发电流重新分布,增加相邻区域的载流密度,从而进一步加剧发热和应力集中。热-力耦合效应在此过程中呈现出链式反应特征,若缺乏有效的热管理与应力缓释设计,将导致接头区域的失效演化速度远高于单一热效应或力学效应作用下的情况。

接头内部不同材料之间的热物性参数与力学性能差异也是形成热-力耦合效应的重要根源。超导带材、稳定材料、绝缘介质及金属夹具在低温环境下表现出不同的线膨胀系数和杨氏模量,当温度变化时,各层材料的应变不匹配导致界面处应力集中。低温条件下多数金属的屈服强度增加、塑性降低,使得应力难以通过塑性变形释放,反而容易在局部累积达到脆性破坏临界值。这种热-力相互强化的机制决定了接头在工程运行中的脆弱性,也为后续的在线监测与失效预防提供了明确的机理基础。

2 热-力耦合失效过程中的关键影响因素分析

高温超导电缆接头的失效过程受多种因素耦合作用,其中界面接触状态是影响热-力耦合失效的首要环节。接头制造过程中若界面平整度不足、压力分布不均匀,容易在微观尺度上形成高接触电阻点,导致局部温升显著。在运行状态下,反复的热循环会使界面结合力下降,产生微间隙,从而进一步增大接触热阻。这一过程不仅引发热点效应,还会在界面周边形成热应力集中区,促使裂纹萌生和扩展,加速失效演化。对于采用钎焊或压接工艺的接头,焊缝组织结构和残余应力分布亦会显著影响接头的热-力稳定性。

冷却条件对热-力耦合失效的影响同样显著。液氮

冷却系统若流量波动或局部阻塞,会引起接头区域的温度非均匀分布,使某些位置的冷却效率下降。当局部温度超过超导材料的临界温度时,该区域转为常导态,电流绕行至其他超导区,导致载流分布不均匀并引发应力重分布^[2]。此时,温度梯度叠加应力梯度,使得热-力场的耦合程度显著增强,局部区域更易发生材料剥离、绝缘击穿等失效形式。冷却介质中夹带的微小气泡或杂质颗粒可能在界面附着,阻碍局部换热,进一步恶化热管理效果。

运行载荷波动及外部扰动也是影响接头热-力耦合失效的重要因素。在电网故障、电流冲击或机械振动作用下,接头承受的载荷会出现突变,这不仅会改变应力分布,还可能触发超导材料瞬时退超现象。频繁的载荷波动加剧材料的疲劳累积,使得细微裂纹在热应力和交变力作用下扩展,最终演变为宏观失效。尤其在城市电网或超高压输电工程中,接头所在环境往往伴随强电磁干扰与机械冲击,这要求在接头设计与运行管理中必须充分考虑这些外部扰动对热-力耦合失效过程的加速作用。

3 面向高温超导接头的在线监测技术体系构建

高温超导电缆接头的热-力耦合失效特性决定了其在线监测必须具备高灵敏度、多参量、实时性与低温适应性。针对温度场的监测,可采用分布式光纤布拉格光栅(FBG)传感技术,将传感光纤嵌入接头绝缘层或固定在结构表面,实现沿接头轴向的连续温度采集。FBG传感器具有电磁免疫、高分辨率和低温适用的特点,能够捕捉热点形成的早期信号。在应力场监测方面,可在关键受力位置布设低温应变计或光纤应变传感器,实时记录由热膨胀不匹配及外部载荷引起的应变变化,从而推断应力分布与演化趋势。

为了对接头运行状态的多维度评估,红外热成像技术可以与光纤传感系统协同工作^[3]。红外探测器可在检修或巡检期间快速扫描接头表面温度分布,发现异常热点区域,并与光纤传感数据进行交叉验证,从而提高诊断的准确性。在电气参数监测方面,可通过高精度霍尔传感器实时测量接头的局部电流密度分布,并结合电压降测量结果推算接触电阻的动态变化。通过数据融合算法,可以将温度、应力与电气信号在统一平台中解析,形成热-力-电三场耦合的运行画像,为失效预警提供依据。

在线监测体系的构建还需要数据处理与智能分析平台的支撑。利用多物理场数值模型与机器学习算法,可对采集到的多源数据进行特征提取与模式识别,识

别出失效的前兆特征信号,并预测其发展趋势。系统可设置多级报警阈值,实现从轻微异常到严重故障的分级预警。监测系统必须考虑低温环境的长期稳定性与传感器可靠性,确保在液氮冷却及强电磁干扰条件下长期稳定运行。最终形成一套集传感、采集、分析与决策为一体的智能在线监测体系,为高温超导接头的安全运行提供实时保障。

在完善的在线监测体系中,还可引入边缘计算技术,将部分数据处理和异常判断在现场端完成,减少数据传输延迟并提升响应速度。结合无线低温通信模块,可在不影响绝缘和冷却的情况下实现远程实时数据回传,为集中控制中心提供即时决策依据^[4]。通过历史监测数据的累积与建模,可不断优化失效预测算法,使其更贴近实际运行规律,形成自适应的健康管理机制,为高温超导电缆接头的长周期稳定运行提供持续技术支持。

4 基于实验与数值模拟的接头运行状态评估方法

接头运行状态的评估需要实验测试与数值模拟相结合,以实现热-力耦合失效过程的精确表征。在实验方面,可通过搭建低温试验平台,对接头样品施加实际工况下的电流、温度和机械载荷,利用嵌入式传感器与外部检测设备同步采集多物理场数据。试验可模拟不同电流冲击幅值、冷却条件变化及外部机械扰动情境,记录接头的温度场演化、应力分布变化及结构损伤特征。这类实验不仅能够验证设计方案的合理性,还能为数值模型的参数标定提供可靠依据。

数值模拟方面,可采用有限元方法(FEM)和多物理场耦合计算,对接头在不同运行条件下的温度场、应力场及电流分布进行精细化分析^[5-8]。模型需要考虑材料的温度依赖性参数、界面接触特性以及冷却流体的传热效果。通过模拟,可以在不破坏实物的情况下预测接头在极端工况下的响应,分析热点形成位置、应力集中区域及潜在失效路径。模拟结果还可与实验数据进行对比,验证模型的准确性,并用于指导结构优化和监测点布设。

为了将实验与模拟结果应用于实际工程评估,可建立基于数据驱动的健康状态指数(HSI)模型,将温度、应力、电阻等关键参量转化为综合健康评分,并结合历史运行数据建立趋势预测曲线。当HSI接近预警阈值时,系统可提前提示运维人员采取降载、局部冷却

增强或计划检修等措施。通过这种实验验证与数值模拟相结合的状态评估方法,可以有效提升接头运行安全性与可靠性,为高温超导输电工程的全寿命管理提供可量化、可预测的技术支撑。

5 结语

高温超导电缆接头的热-力耦合失效不仅涉及多物理场的复杂作用机理,还受到材料特性、结构与运行环境等多重因素影响。通过深入剖析形成机制、识别关键影响因素、构建在线监测体系,并结合实验与数值模拟开展状态评估,可实现从机理认知到风险预测的全链路技术支撑。这一研究不仅为提升高温超导输电系统的运行安全与可靠性提供理论依据,也为后续工程优化与智能运维奠定了坚实基础。

参考文献

- [1] 徐莹.三相同轴高温超导电缆暂态稳定性研究[D].北京:北京交通大学,2023.
- [2] 李显皓,徐颖,任丽,等.非均匀高温超导带材对 CORC 电缆失超特性的影响研究[J].电工技术学报,2022,37(19):5044-5055.
- [3] 周考.分布式光纤测温技术在高温超导电缆中的工程化应用研究[D].湖北:华中科技大学,2021.
- [4] 彭旭斌.高温超导带材及其接头和线圈结构脱粘行为的数值模拟[D].甘肃:兰州大学,2021.
- [5] 李超,杨文超,杨嘉彬,等.接头电阻对 CORC 电缆交流损耗的影响分析[J].电工技术学报,2024,39(16):4909-4917.
- [6] 漆春,高创业,王汝飞,等.硅橡胶在电力电缆接头防护中的应用与环境适应性研究[J].现代传输,2025(3):76-79.
- [7] 田书欣,肖文渊,符杨,等.极端高温灾害下电缆型配电网韧性提升策略研究[J].中国电机工程学报,2025,45(9):3408-3419,中插 11.
- [8] 铁源,何峰,苟军.抗冲击防火型电缆护套管在高压电力系统中的防护效果分析[J].科技资讯,2025,23(7):94-96.

版权声明:©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS