

严寒环境电气化铁路 27.5kV 电缆检测方法研究

邵岩¹ 杨佳¹ 李默然¹ 杨洋¹ 裴志禹¹

1. 中铁二院工程集团有限责任公司 成都 610031; 2. 四川大学 成都 610031

DOI:10.32629/ems.v8i6.20572

[摘要] 我国交通强国建设与“十五五”铁路规划对牵引供电系统安全提出高要求,严寒环境铁路普遍使用 XLPE 电缆供电。受恶劣环境影响,电缆绝缘易老化,且附件故障远多于本体,成为供电安全的制约因素。在低温与冲击负荷下,电缆附件更易失效。现有检测技术存在明显局限,传统在线方法适用性不足,离线检测需停电无法满足运营需求,智能检测则受数据与成本限制。局部放电监测是较优方案,但极端工况下放电演变规律不明确,易出现检测正常却突发故障的情况。因此,研究严寒环境电气化铁路 27.5kV 电缆检测方法,对于实现电缆运行状态的准确诊断具有重要意义。

[关键词] 电气化铁路; 27.5kV 电缆; 劣化特性; 检测方法

引言

我国“交通强国”建设与“十五五”铁路标准化发展规划都明确强调需要提升牵引变电系统的安全稳定性,支撑国家经济高质量发展。随着我国高速铁路建设的显著突破,严寒地区高速铁路逐渐建成投运。受限于敷设条件及环境的影响,需采用电缆方式供电。鉴于牵引供电系统对供电可靠性和安全性的高要求,交联聚乙烯电缆因其优良的电、热、机械性在牵引供电系统中得到广泛应用^[1]。

XLPE 电缆在正常环境中的寿命约为 30 年,但已有运行十余年缆故障频发。这表明实际使用寿命受到敷设环境、使用条件等因素的影响,电缆本体与电缆附件(包括电缆终端与电缆接头)绝缘会逐渐劣化,进而导致缺陷产生与放电发展,严重时引发绝缘失效导致停电事故发生。通过对计及外力和不计及外力的电缆故障位置进行统计对比,附件故障的发生率远高于电缆本体故障,进一步验证了附件界面绝缘是电缆系统最薄弱的环节,而电缆附件对于电缆系统必不可少,因此,针对铁路电缆附件界面绝缘状态进行有效监测和诊断,有助于提前发现潜在缺陷,避免故障扩展,从而保障牵引供电系统的长期可靠运行^[2]。

1 严寒环境对 27.5kV 电缆性能需求的影响

铁路牵引供电系统负荷与传统电力系统有较大差异,且严寒地区气温极低,极端运行工况给铁路供电电缆附件界面绝缘带来新的问题,不同环境条件(具体指温度、负荷类型)铁路架空线路、电力电缆、普通铁路供电电缆以及严寒地区铁路供电电缆面临的工况下,传统架空线路由于其较低的成本、便于维护和传输损耗小等优势,常用于铁路供电系统。然而,这种电缆易受环境变化等外部因素影响,导致其在极端环境下的可靠性降低。随着温度降低并且负荷类型从电力负荷转变为牵引负荷时,供电电缆对绝缘性能的要求显著增加,特别是在严寒环境铁路电缆的需求最为突出,接下来详细阐述不同温度与负荷类型对电缆性能需求的影响^[3]。

1.1 温度影响

温度是影响电缆性能的重要因素之一,其对电缆的绝缘性能、机械强度和使用寿命均有显著影响。不同地区的电缆其工作环境温度存在一定差异。接下来将对比普通地区电力电缆、严寒地区电力电缆和严寒地区铁路供电电缆三者的工作环境,探讨严寒地区铁路馈线电缆所面临的特殊工况。

(1) 电力电缆

普通地区电力电缆通常处于环境温度波动较小的区域,大多在地下铺设,运行环境通常较为单一。与普通地区电力电缆相比,严寒地区电力电缆面临的温度挑战更加严峻。温度常常低于 -20°C ,甚至可达到 -40°C 或更低,电缆的绝缘材料(如交联聚乙烯)在这种低温环境下容易发生脆化,导致电缆的结构损坏或绝缘破坏,进而使得绝缘性能下降。

(2) 铁路供电电缆

与普通严寒地区电力电缆相比,严寒地区铁路供电电缆的工作环境更为复杂。这是因为其通常暴露在外部环境中,不仅需要在极低温度下工作,还需要经受列车的动态冲击负荷。在这些因素与温度变化的协同作用下,铁路供电电缆的绝缘性能需求日益增加。

1.2 负荷类型影响

电力负荷和牵引负荷均代表电力系统的电能需求量,但二者在特性和数据表现上存在显著差异。电力负荷通常指电网或特定区域在某一时刻的总体用电需求,受季节变化、气候条件、时间段和经济活动等多种因素影响,呈现较为规律的周期性波动。例如,在典型地区的电力负荷数据中,夏季和冬季由于空调和供暖设备的使用,负荷常常达到高峰,而春秋季节则相对平稳。电力负荷数据通常以小时或更长间隔记录,主要用于反映整体用电趋势。牵引负荷特指电气化铁路系统中列车运行过程对电网的功率需求,其特点是负荷变化频繁且幅度大,主要受列车运行图、列车类型、线路坡度等因素影响。研究表明,动车组在区间运行时,其负荷特性呈现出明显的动态变化,需要结合实测数据和行车运行图进行精确预测。因此,牵引负荷数据需要更高的时间分辨率,通常以秒级或分钟级间隔记录,以捕捉列车启动、加速、制动和爬坡等运行状态下的负荷变化。

1.3 温度和负荷的协同作用

通过对比配网电力电缆和严寒地区铁路电缆的运行工

况,发现其关键差异在于严寒环境与铁路冲击负荷的协同作用,因此仅详细介绍这两种因素。相较之下,铁路工况中的其它影响因素(例如机械振动、湿度和负荷波动在电力电缆中也同样普遍存在,所以并不构成铁路电缆特有的研究难点。

电力系统负荷一般波动不会太大,而铁路牵引负荷具有频繁冲击的特殊性,当列车经过时,电缆绝缘瞬时温度迅速上升,而在列车经过后,供电区段内负荷骤降为0。同时,当铁路沿线最低气温达到 -35°C ,馈线电缆附件绝缘面临极大温差循环作用。在极大温差长时间循环作用下,硅橡胶高弹体的非线性粘弹性不断发展导致力学性能加速劣化,且交联聚乙烯与硅橡胶在极大温差热应力频繁作用下会产生差异性膨胀及收缩往复过程,界面呼吸作用与加速劣化的硅橡胶力学性能导致界面产生局部电应力和热致应力集中,促进界面微观缺陷动态发展,给铁路供电电缆附件界面绝缘带来巨大隐患^[4]。

2 电缆附件界面多层材料匹配研究

2.1 界面压力

电缆附件的绝缘性能主要依赖于硅橡胶与主绝缘(XLPE)之间的过盈配合,其界面电气强度很大程度上取决于多层材料的贴合程度。提高界面光滑度及适当增加界面压力可有效抑制局部放电的发生和发展。然而,在实际应用中,电缆附件界面无法完全贴合,这主要受安装缺陷和材料表面微观不平整的影响。安装缺陷可通过优化施工工艺加以控制,而界面微观缺陷则需尽可能保证界面处的良好贴合,即界面压力应保持在合理范围内($0.1\sim 0.25\text{ MPa}$),它的形成主要来源于外部硅橡胶材料扩张,使硅橡胶与交联聚乙烯之间形成良好的材料性能匹配^[5]。

在多层绝缘系统中,材料的匹配性对界面绝缘强度具有决定性作用。研究发现,硅橡胶的扩张率、弹性模量及热膨胀系数是影响界面击穿强度的关键。温度变化可能会导致相

关关键因素发生改变,通过影响界面接触面积及微观缺陷尺寸进而影响界面放电特性。已有研究表明,界面若存在微小缺陷,热致应力可能导致缺陷进一步扩展,进而加速界面绝缘的劣化。特别是在低温环境下,材料收缩程度不同会加剧界面匹配状态的恶化,进一步诱发局部放电。极端低温环境不仅影响界面缺陷的暴露程度,还会改变电缆附件内部材料的匹配状态,从而加剧界面绝缘劣化。

对于冷缩电缆附件而言,其界面绝缘匹配状态不佳的直接原因在于界面压力不足或过盈。当界面压力不足时,界面贴合度降低,界面微观缺陷尺寸较大,局部电场畸变加剧,局部放电触发概率提升,导致绝缘性能劣化。而当界面压力过高时,绝缘层将会承受过大的机械应力,导致材料内部应力集中,进而引发塑性变形、应力松弛或微裂纹扩展,加速材料老化,最终影响电缆附件的长期绝缘可靠性和运行稳定性。多层绝缘在不同的温度条件下材料特性差异性改变导致界面压力发生变化。对电缆附件施加长期冷热循环实验,发现界面压力的长期演化规律与温度循环模式密切相关。现有研究的实验对象在任意时间点通常仅承受单一环境应力作用,而针对多重应力叠加作用下电缆附件界面绝缘性能的演变规律研究相对有限。然而,在严寒铁路牵引供电系统中,电缆附件不仅受到低温环境影响,同时还受到列车运行引起的冲击负荷的动态作用。目前,多重应力对电缆附件界面绝缘的影响规律尚缺乏系统性研究,特别是在极端环境下,界面压力的动态演变机制尚不明确^[5]。

(2) 局部放电

电缆附件采用固-固复合绝缘结构,由于材料表面无法完全理想贴合,界面无法避免的会存在微小空腔缺陷,导致其成为电缆系统的绝缘薄弱点。微观缺陷处的放电是降低界面绝缘性能、引发附件绝缘失效的主要原因。而实际上电缆附件在现场安装过程中需要对主绝缘表面进行打磨,界面处的

空腔缺陷很小难以通过肉眼观察,人为加大空腔尺寸获得的缺陷演变特性必然与真实缺陷发展存在极大区别,进而影响研究结果的准确性。

为了更准确地评估放电行为并理解不同条件下的局部放电特性,通过搭建有限元仿真模型模拟放电现象,通过对比模拟和测量结果从而研究界面发展特性。然而,已有研究主要根据放电影响因素设置不同的仿真条件来观察放电特征参量的变化,这仅仅是研究这些因素本身对放电行为的影响,未能结合实际电缆运行过程中的动态变化进行深入研究。

在高寒地区铁路供电电缆中,复合界面不仅承受低温环境的影响,还受到列车运行时引发的冲击负荷作用,这种多重应力的协同作用直接影响界面气隙空腔的动态变化及其放电行为。尽管已有研究对界面空腔的局部放电特性进行了探讨,但在低温环境和冲击负荷共同作用下,电缆附件界面微小空腔缺陷的动态变化规律尚不清楚。因此,有必要开展针对严寒工况下电缆终端复合界面局部放电特性的试验与仿真研究,深入探讨空腔的动态演变过程,揭示多重应力协同作用下的放电机理,为电缆附件的长期稳定性和可靠性提供理论支持和工程指导。

3 严寒环境下铁路供电电缆检测技术

根据前述关于界面压力和局部放电的研究中可知严寒环境下铁路供电电缆的可靠性成为关键问题,尤其是在低温和冲击负荷的双重作用下,电缆附件的绝缘性能容易劣化,进而引发电缆故障,给铁路的安全运行带来极大挑战。因此有效、准确的电缆状态检测对于避免故障突发具有重要的意义。电力电缆的基本检测技术包括在线检测技术和离线检测技术,这两类方法各有特点,适用于不同的场景和需求。

在线检测技术能够在不中断供电的情况下实时监测电缆的运行状态,比较适合在严寒地区铁路供电电缆的运维中应用。其中,红外测温方法主要是采用红外测温手段检测电缆

异常发热点。然而，由于电缆外表面测温容易受环境温度干扰以及外表面温度与内绝缘运行状态的关联性目前尚不明确，故而检测有效性低，在严寒条件下适用性有限。直流分量法具有非侵入性和实时检测的优势，但由于漏电流较小且易受噪声干扰，导致其测试精度较低，限制了其应用范围。 $\tan \delta$ 法能够实时评估绝缘老化及湿度变化，且具有较高的灵敏度，但传统的损耗因子测量方法在捕捉绝缘状况渐变方面

存在不足，因此其适用性也受到限制。相比于上述方法，局部放电监测法则能够直接监测绝缘状态，具备实时监测能力，并且在适用性方面表现较好，是目前较为适合严寒地区铁路电缆绝缘状态评估的方法。与在线检测方法相比，离线检测技术虽然能够获得更详细的绝缘性能参数，但由于需要停电操作，无法满足铁路供电电缆在不间断运行条件下的检测需求，因此在实际运行环境中适用性受到限制。

检测类型	检测方法	核心优势	主要不足	严寒铁路场景适用性
在线检测	红外测温	非侵入、可实时监测	易受环境温度干扰，内外绝缘状态关联不明确，有效性低	较差
	直流分量法	非侵入、可实时检测	漏电流小、易受噪声干扰，测试精度低	较差
	$\tan \delta$ 法	灵敏度较高，可评估绝缘老化与湿度	难以捕捉绝缘状态渐变过程	一般
	局部放电监测	直接反映绝缘状态，实时性好，适用性强	极端工况下放电演变规律尚不明确	最优
离线检测	常规绝缘试验	可获取详细、全面的绝缘参数	需停电作业，无法满足不间断供电要求	很差

4 结语

局部放电检测方法因其实时性和不间断运行的特点，更适合在严寒环境 27.5kV 电缆的运维中应用。然而，在实际运维中，局部放电检测法常出现“测试时放电量小，但运行较短时间内后电缆故障突发”的现象，这表明放电发展过程在极端工况下表现出极大的非线性。严寒环境 27.5kV 电缆不仅面临低温环境的长期作用，还受到列车运行冲击负荷的动态影响，其放电发展的非线性特征尚不明确。只有摸清极端运行工况下放电的分阶段演变特性，才能实现供电电缆运行状态的有效诊断。因此，深入研究极端应力条件下电缆绝缘劣化的分阶段放电演变特性，对于实现电缆运行状态的准确诊断具有重要意义。

[参考文献]

[1]朱光亚, 沈青, 李军, 等. 严寒运行工况下高速铁路供电电缆附件界面绝缘匹配劣化特性[J]. 高电压技术, 2025, 51(03): 1361-1370. DOI:10.13336/j.1003-6520.hve.20240483.

[2]冷热循环对电缆附件界面压力及带材材料特性的影

响. 王子康;周凯;朱光亚;梁钟颖;傅尧;赵琦. 高电压技术, 2022(06)

[3]王洪, 李刚, 张晨晨. 严寒地区高速铁路 27.5kV XLPE 电缆绝缘劣化特性试验研究 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42 (15): 5562-5572.

[4]刘泽洪, 陈维江, 张鹏飞. 电气化铁路牵引供电电缆局部放电在线监测技术及应用 [J]. 电网技术, 2021, 45 (8): 3102-3110.

[5]赵学风, 段浩, 李喜桂. 低温冷热循环下电缆附件界面压力与局部放电特性研究 [J]. 高电压技术, 2023, 49 (2): 689-697.

[6]国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 28427-2026 电气化铁路电缆 27.5kV 单相交流电力电缆及附件[S]. 北京: 中国标准出版社, 2026.

作者简介: 邵岩 (1985 年 1 月), 男, 汉族, 甘肃, 硕士研究生, 中铁二院工程集团有限责任公司, 高级工程师, 接触网, 其他信息。