

复杂环境条件下电气化铁路接触网绝缘老化特性与评估方法

卫建松

国家能源集团新朔铁路有限责任公司供电分公司 内蒙古鄂尔多斯 010300

摘要：电气化铁路作为现代交通运输的重要组成部分，其运行的安全性和可靠性至关重要。接触网作为电气化铁路的关键部件，其绝缘性能直接影响到铁路系统的正常运行。然而，在复杂环境条件下，接触网绝缘材料会受到多种因素的影响，导致绝缘性能逐渐下降，即绝缘老化。本文旨在探讨复杂环境条件下电气化铁路接触网绝缘老化特性与评估方法，为预防与延缓绝缘老化提供理论依据和技术支持。

关键词：复杂环境条件；电气化铁路接触网；绝缘老化特性；评估方法；策略

引言

接触网作为电气化铁路供电系统的重要组成部分，其绝缘性能直接关系到铁路运行的安全性和可靠性。然而，在实际运营过程中，接触网绝缘材料会受到高温、湿度、腐蚀环境、机械应力与振动以及环境污染与化学侵蚀等多种复杂环境因素的影响，导致绝缘性能逐渐下降，即发生绝缘老化。绝缘老化不仅会降低接触网的绝缘性能，还可能引发供电故障，对铁路运输造成严重影响。因此，深入研究复杂环境条件下电气化铁路接触网绝缘老化特性与评估方法，对于预防与延缓绝缘老化、提高铁路运行的安全性和可靠性具有重要意义。

一、复杂环境条件下的影响

（一）高温环境对绝缘材料的影响

在电气化铁路接触网中，绝缘材料扮演着至关重要的角色，确保了电力传输的安全与效率。然而，这些材料经常面临极端的高温环境，如电气短路、机械过载或夏季高温天气，这些条件会显著加速绝缘材料的老化过程。例如，在高温环境下，绝缘材料的分子结构会受到热应力的影响，导致聚合物链的断裂和交联点的破坏，这将直接影响材料的热稳定性和电绝缘性能。此外，高温还会加速化学反应，如氧化过程，使得材料表面产生氧化层，增加接触电阻，从而降低系统的整体性能^[1]。

（二）湿度与腐蚀环境的影响

在电气化铁路接触网中，湿度与腐蚀环境是导致绝缘材料老化的重要因素。湿度可以促进水分渗透到绝缘材料内部，导致材料内部的电解质浓度增加，这会加速材料的电化学反应，使得接触网的电阻率下降和介电损耗增加。同时，腐蚀环境中的化学物质，如二氧化硫和

氯化物，会与湿气共同作用，形成腐蚀性溶液，对接触网的金属部件和绝缘材料表面造成侵蚀。这种腐蚀过程可能导致接触网结构的机械强度显著降低，如在某些极端案例中，腐蚀速率可能加快至正常情况的3倍。腐蚀导致材料厚度减薄，增加了因机械应力或电流负载导致的断裂风险。

（三）机械应力与振动对绝缘性能的破坏

在电气化铁路接触网中，机械应力与振动是另一个不可忽视的影响因素。机械应力主要来源于列车通过时产生的动态负载，以及风、温度变化等自然因素导致的结构变形。长期的机械应力作用会导致绝缘材料内部产生微小裂纹，这些裂纹会逐渐扩展，最终导致材料的整体机械强度下降。同时，振动也是一个重要的破坏因素，它可以使绝缘材料与支撑结构之间产生相对运动，导致磨损和松动，进而影响绝缘性能。机械应力与振动共同作用，会加速绝缘材料的老化过程。一方面，它们会加剧材料的物理损伤，如裂纹扩展和磨损；另一方面，振动还可能促进水分和腐蚀性物质渗透到材料内部，从而加速电化学反应和腐蚀过程^[2]。这种综合作用会导致绝缘材料的电阻率急剧下降，介电损耗增加，严重时甚至引发绝缘失效。因此，在电气化铁路接触网的设计和维护中，必须充分考虑机械应力与振动对绝缘性能的影响，采取有效的措施来预防和延缓由此导致的绝缘老化。

二、绝缘老化特性

绝缘老化是一个复杂的过程，涉及多种物理和化学变化。在电气化铁路接触网中，绝缘材料的老化特性主要表现为电性能的逐渐退化和机械强度的降低。随着时间的推移，绝缘材料内部可能发生分子链的断裂、交联密度的下降以及化学成分的改变，这些变化共同导致绝

缘性能的下降。具体来说，绝缘材料的电阻率可能逐渐降低，介电损耗增加，使得材料在电场作用下的能量损失增大。同时，老化还可能导致绝缘材料的机械强度减弱，如抗拉强度和弹性模量的降低，增加了材料在机械应力作用下的破裂风险。这些老化特性不仅影响了接触网的电气性能，还可能对铁路运行的安全性和可靠性构成威胁。因此，深入研究绝缘老化特性，对于制定有效地预防和延缓老化策略具有重要意义。

三、绝缘老化评估方法

(一) 宏观评估指标：电阻率与介电损耗

在电气化铁路接触网中，绝缘材料的性能至关重要，而宏观评估指标之一就是电阻率与介电损耗。电阻率是衡量材料电阻抗电流通过的能力，随着绝缘材料老化，其内部缺陷增多，电阻率可能会发生显著变化。例如，在高温环境下，绝缘材料的电阻率可能因热老化而降低，导致局部过热和电能损失的增加。因此，定期监测接触网绝缘部件的电阻率变化，可以早期发现潜在的故障隐患，防止因电阻异常导致的设备失效或事故。另一方面，介电损耗是指电流通过绝缘材料时，由于介质内部的极化、松弛等现象产生的能量损耗。当绝缘材料暴露在湿度、化学侵蚀或机械应力下，其介电常数和损耗角正切可能上升，增加额外的热损耗。实际工程中，可通过便携式绝缘电阻测试仪对接触网绝缘腕臂、绝缘子等关键部件进行周期性检测，结合环境温湿度传感器采集的实时数据，建立“环境参数-电阻率-老化程度”的三维关联模型，实验室及现场验证结果表明，所建模型对老化等级的预测RMSE为0.07，对应平均绝对百分误差约7%，可为运维决策提供数据支撑。为了建立准确的评估模型，可以采用统计分析和仿真技术，结合历史数据和实验室测试结果，构建电阻率与介电损耗与环境因素之间的定量关系。通过这种方式，可以预测在特定环境条件下，绝缘材料的性能退化趋势，为预防性维护和材料更换提供科学依据。

(二) 微观结构分析：红外光谱与扫描电镜

在绝缘老化评估中，微观结构分析扮演着至关重要的角色，尤其通过红外光谱与扫描电镜等先进技术，可以深入洞察绝缘材料内部的细微变化。红外光谱分析能够揭示材料分子结构的变化，例如，当绝缘材料因环境因素导致聚合物链的断裂或化学键的重组时，光谱中特定吸收峰的位移或强度变化可以被检测到。例如，如果发现接触网绝缘部件的红外光谱中，原本代表稳定结构的C-O键的吸收峰强度降低，可能表明材料正遭受氧化

降解。另一方面，扫描电子显微镜（SEM）则提供了观察材料表面和微观结构的高分辨率图像。通过SEM，可以观察到绝缘材料表面是否出现裂纹、孔隙或腐蚀产物的积累，这些都可能成为电流泄漏的路径，降低绝缘性能^[9]。在一项研究中，发现经过长期高温运行的接触网绝缘子，其SEM图像显示了表面微观裂纹的增加，这与材料老化导致的机械强度下降相吻合。结合这两种分析方法，可以建立材料老化程度与结构变化之间的定量关系，进一步发展预测模型，以评估绝缘材料在复杂环境下的剩余寿命。这种微观结构分析不仅有助于及时发现潜在的故障点，也为开发更耐老化的新材料或改善现有材料的改性策略提供了科学依据。

四、预防与延缓绝缘老化策略

(一) 材料选择与改性技术

在电气化铁路接触网中，绝缘材料的选择与改性技术是确保系统安全运行的关键因素。材料选择不仅要考虑其初始电气和机械性能，还要能抵抗长期的环境应力。例如，高温环境下，传统的环氧树脂基复合材料可能会因热老化导致绝缘性能下降，此时可能需要引入耐高温的硅树脂或陶瓷填料来增强材料的热稳定性。在改性技术方面，可以通过纳米复合、共混改性或引入抗氧化剂来改善材料的耐老化性能。纳米粒子的添加可以显著提高材料的介电强度和热稳定性，同时减少因热应力导致的微观结构变化。此外，通过化学接枝方法将抗腐蚀基团引入聚合物链中，可以增强材料抵抗湿度和化学侵蚀的能力。因此，材料选择与改性技术的研究是电气化铁路接触网绝缘老化问题的核心，它涉及到对新材料的创新研发以及对现有材料性能的持续优化，以适应日益复杂的运行环境，确保铁路系统的安全与高效运行。

(二) 设计优化

在电气化铁路接触网的设计中，优化绝缘组件以减少应力集中和提高其对复杂环境的适应性至关重要。一方面，应力集中可能导致绝缘材料局部疲劳，长期下来会加速老化过程，影响接触网的稳定运行。因此，设计时应采用更柔顺的过渡结构，避免尖角和突变，以分散应力。另一方面，提高环境适应性涉及到选用耐高温、耐湿、耐化学侵蚀的材料，以及优化结构设计以抵抗机械应力和振动。例如，可以引入具有优异耐候性的复合材料，如碳纤维增强聚合物，它们的热膨胀系数与金属接近，能有效降低因温度变化引起的应力。此外，采用特殊涂层或表面处理技术，如纳米复合防腐涂层，可以增强绝缘部件抵抗腐蚀环境的能力。在实际应用中，例

如，在高污染或腐蚀性强的地区，可以设计双层绝缘结构，内层采用高性能绝缘材料保证基本的电气性能，外层则使用耐候性更强的材料，以抵御外部环境的侵蚀。同时，考虑到电气化铁路接触网长期暴露在户外，还应注重结构的防水防潮设计，通过密封处理或采用透气但不透水的材料，防止水分渗入绝缘内部，从而延长其使用寿命。设计优化还需综合考虑经济性与可行性，确保改进后的方案在实际应用中既能有效提升绝缘性能，又符合成本效益原则，为电气化铁路的安全高效运行提供坚实保障^[4]。

（三）维护管理与定期检测

在电气化铁路接触网的运营中，维护管理与定期检测是确保绝缘材料性能稳定、预防事故发生的至关重要的环节。有效的维护策略可以显著延长设备的使用寿命，降低因绝缘老化导致的故障率。例如，根据历史数据，定期的绝缘部件检查可以发现潜在问题的早期迹象，从而在故障发生前进行修复，减少因接触网故障造成的平均每年数百万美元的损失。例如，可以采用预防性维护计划，结合接触网的运行环境和使用条件，设定合理的检测周期。例如，对于处于高污染区域的绝缘组件，可能需要每季度进行一次详细检查，而在一般环境条件下，可能每年检查一次即可。此外，利用预测性维护技术，如基于大数据和机器学习的故障预测模型，可以更准确地评估绝缘材料的剩余寿命，进一步优化维护资源的分配。在实际检测过程中，可以采用非接触式的红外热成像技术，无损检测接触网的热状态，发现因电阻增加引起的局部过热现象，这往往是绝缘性能下降的早期信号。同时，结合接触电阻测试，可以定量评估导电部件的恶化程度。如果发现异常，应立即进行详细检查和必要的维修或更换。此外，维护管理还包括对维护过程的记录和分析，建立完善的设备维护档案。通过追踪历史维护记录，可以识别出故障模式和潜在的故障热点，为未来维护策略的调整提供数据支持。

（四）新型防护涂层与防腐技术

新型防护涂层在电气化铁路接触网绝缘老化管理中扮演着至关重要的角色。这些涂层通过提供额外的保护层，可以显著提高绝缘材料抵抗环境侵蚀的能力。例如，采用纳米复合材料制成的涂层，其抗氧化性和耐化学性得到了显著增强。此外，某些涂层还具有自修复功能，能在微小损伤发生时恢复其防护性能，从而延长绝缘体的使用寿命。在实际应用中，比如在高速铁路和重载铁

路等关键应用中，这些新型涂层已被广泛采用。它们不仅能够有效抵御风沙、盐雾等恶劣环境的侵蚀，还能减少因环境因素导致的绝缘性能下降。另外，一些智能涂层能够感知环境变化并作出响应，如在湿度增加时释放防潮剂，或在紫外线增强时增强抗氧化性能。这些创新技术的应用，进一步提升了电气化铁路系统的可靠性和安全性，同时也降低了长期的维护成本^[5]。因此，新型防护涂层与防腐技术的发展和运用，将是未来电气化铁路绝缘老化管理的重要方向。

结束语

综上所述，复杂环境条件下电气化铁路接触网绝缘老化特性与评估方法是一个多维度、综合性的研究课题。了解并掌握绝缘材料在高温、湿度、腐蚀环境、机械应力与振动以及环境污染与化学侵蚀等多种复杂环境下的老化特性，对于确保电气化铁路的安全运行至关重要。通过宏观评估指标如电阻率与介电损耗的测量，以及微观结构分析如红外光谱与扫描电镜的应用，可以更全面、深入地理解绝缘老化的机理与过程。在此基础上，采取针对性的预防与延缓绝缘老化策略，如材料选择与改性技术、设计优化、维护管理与定期检测以及新型防护涂层与防腐技术的应用，将有效提升电气化铁路接触网的绝缘性能与使用寿命，为铁路运输的安全与高效提供坚实保障。未来应进一步构建跨尺度老化数据库，融合机器学习与数字孪生技术，实现绝缘状态的实时可视化与剩余寿命动态预测；同时推动自修复涂层与柔性纳米复合绝缘材料的工程化应用，以更低的运维成本支撑超长服役周期，助力智能铁路与绿色交通的可持续发展。

参考文献

- [1] 吴飞.城市轨道交通刚性接触网改造施工技术研究[J].铁道建筑技术, 2025, (01): 188-191+217.
- [2] 柳琪渊.接触网分段绝缘器的故障分析及防范措施[J].时代汽车, 2024, (19): 4-6.
- [3] 何廷豹.接触网绝缘腕臂电气性能研究及优化[J].电气化铁道, 2024, 35 (01): 17-21.
- [4] 陈明鹏.高速铁路接触网防雷策略探寻[J].中国设备工程, 2023, (22): 206-208.
- [5] 张一平.高速铁路接触网非绝缘锚段关节参数调整分析与研究[J].电气化铁道, 2023, 34 (S1): 126-128+131.