

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.04.020

低压架空电缆绝缘材料老化开裂分析

李成钢,张建国,杨立恒,袁光宇,刘建军,陈大兵

(国网江苏省电力有限公司电力科学研究院,南京 211103)

摘要:某 10 kV 线路末端低压架空电缆在运行中出现绝缘材料老化、脱落现象,对其开展宏观检测、热重分析、差示扫描量热分析、傅立叶变换红外光谱分析,并和另一相同运行环境、时间、同一型号的架空电缆进行对比。分析表明,该架空电缆绝缘材料交联程度低,耐老化性能差。交联度不足是造成绝缘材料开裂剥落的主要原因。因此,建议加强对架空电缆入网质量的检测,定期对在运架空电缆材料进行耐老化性能检测和评估,降低其安全运行风险。

关键词:绝缘;老化;开裂;交联度

中图分类号: TM21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)04-0099-04

Analysis on Insulation Materials Ageing Cracking of Low Voltage Overhead Cables

Li Chenggang, Zhang Jianguo, Yang Liheng, Yuan Guangyu, Liu Jianjun, Chen Dabing

(State Grid Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: The phenomenon of insulation aging and shedding on the low-voltage overhead cables occurred at the end of a 10 kV transmission line during operation. Macroscopic testing, thermogravimetric analysis, differential scanning calorimetry analysis and Fourier transform infrared spectroscopy analysis were carried out for the bad overhead cables, and a comparison was made between the bad overhead cables and another low-voltage overhead cable of the same type under the same operating environment and operating time. The analysis results show that the crosslinking degree of insulation of the overhead cables is low and aging resistance of the cables is poor. It is suggested to strengthen the quality inspection before the wires entered the power grid, and to test and evaluate the aging resistance of the insulated conductors on a regular basis in the overhead transmission to reduce the risk of operation.

Keywords: insulation; aging; cracking; crosslinking degree

架空绝缘电缆是带有绝缘层的架空电缆,采用类似于交联电缆生产工艺制造的一种专用电缆,是介于架空电缆和地下电缆之间的一种输电方式^[1]。架空绝缘电缆具有优良的综合性能以及便于维修、成本合理等优点,能更好地提高供电的可靠性、稳定性和安全性,节约线路运维费用^[2]。采用架空绝缘电缆代替裸架空电缆,是实现配电线路绝缘化的技术进步措施。日本、瑞典、法国、芬兰、德国等发达国家在 20 世纪 60 年代初就开始研究生产架空绝缘电缆,目前我国在城市的老旧电网改造中也大都采用了架空绝缘电缆。但架空绝缘电缆由于原材料、制造工艺等原因,在运行中可能发生绝缘材料老化失

效的情况,容易引起输电线路故障^[3-4]。

2018 年 6 月,线路巡视发现某 10 kV 线路末端架空电缆绝缘材料存在严重的老化、脱落现象,如图 1 所示。该架空电缆型号为 JKLYJ-1,1×150,制造日期为 2014 年 5 月 11 日,投运日期为 2014 年 6 月 20 日。

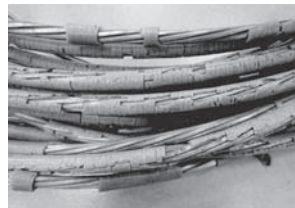


图 1 架空电缆绝缘材料老化开裂情况

基金项目: 国家电网公司科技项目 (5455DW180001)

通讯作者: 李成钢,硕士,高级工程师,主要从事电网材料检测和研究工作 E-mail: 13951006295@163.com

收稿日期: 2019-01-26

引用格式: 李成钢,张建国,杨立恒,等. 低压架空电缆绝缘材料老化开裂分析[J]. 工程塑料应用,2019,47(4): 99-102.

Li Chenggang, Zhang Jianguo, Yang Liheng, et al. Analysis on insulation materials ageing cracking of low voltage overhead cables[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(4): 99-102.

1 实验内容

1.1 原材料

失效架空电缆老化开裂绝缘材料取自现场;

同型号、同时间、同环境的完好架空电缆绝缘材料取自现场。

1.2 仪器及设备

傅立叶变换红外光谱 (FTIR) 仪: NEXUS 870 型, 美国尼高力公司;

热重 (TG) 分析仪: Q50 型, 美国 TA 公司;

差示扫描量热 (DSC) 仪: Q2000 型, 美国 TA 仪器公司。

1.3 测试方法

(1) FTIR 分析。

对老化开裂绝缘材料和完好架空电缆的未老化交联聚乙烯绝缘材料进行了 FTIR 的对比分析, 测试方式采用反射法, 扫描范围 $600 \sim 4000 \text{ cm}^{-1}$ 。

(2) TG 分析。

分别选取老化开裂绝缘材料和未老化绝缘材料约 10 mg, 对其进行 TG 分析, 研究其热稳定性, 测试范围 $40 \sim 550^\circ\text{C}$, N_2 气氛, 吹扫速率 50 mL/min , 升温速率 10°C/min 。

(3) DSC 分析。

分别选取老化开裂绝缘架空电缆绝缘材料和未老化架空电缆绝缘材料约 10 mg, 对其进行 DSC 分析, 研究其熔融过程中的结晶形态。测试范围 $40 \sim 150^\circ\text{C}$, N_2 气氛, 吹扫速率 50 mL/min , 升温速率 10°C/min 。

2 结果分析

2.1 宏观检查

对架空电缆绝缘材料的开裂情况进行观察, 图 2 为架空电缆绝缘材料老化开裂局部图。发现架空电缆绝缘材料存在严重的老化开裂现象, 绝缘脆化, 呈块状剥落, 线芯大面积的裸露在外部环境中, 对剥落的绝缘材料稍用力即可扳断。该架空电缆 2014 年 6 月投运, 对比同一型号、同一时间投运的另一厂家的架空电缆表面 (如图 3 所示)。发现表面情况良好, 并未出现明显的老化现象, 说明该失效架空电缆绝缘材料的绝缘耐老化性能较差。



图 2 架空电缆绝缘材料老化开裂局部图

该架空电缆绝缘材料为交联聚乙烯, 由于交联

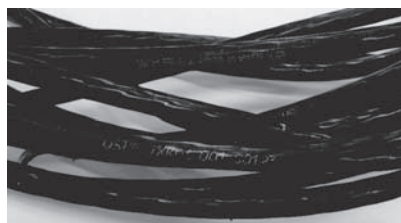


图 3 同型号、同时间投运的另一厂家的架空电缆表面照片

过程把聚乙烯分子的线性状态通过交联剂形成立体的网状结构, 使硅烷交联聚乙烯绝缘架空电缆具备优异的绝缘性能、力学性能、耐热性能及耐老化性能等^[5-6], 若交联度不足甚至没有交联, 直接用聚乙烯代替, 则绝缘材料耐老化性能会明显变差。

2.2 FTIR 分析

为了分析老化开裂的绝缘材料是否为交联聚乙烯以及其交联程度, 对未老化交联聚乙烯绝缘材料和老化开裂绝缘材料进行了 FTIR 的对比分析, 分析结果见图 4 和图 5。

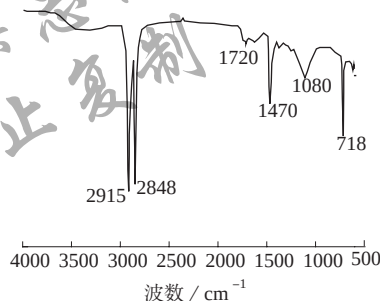


图 4 未老化交联聚乙烯绝缘材料的 FTIR 谱图

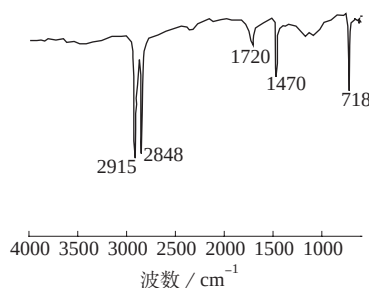


图 5 老化开裂绝缘材料的 FTIR 谱图

由图 4 和图 5 可以看出, $2915, 2848, 1470, 718 \text{ cm}^{-1}$ 附近的峰均为聚乙烯的特征吸收峰, 其中 2915 cm^{-1} 为 $-\text{CH}_2-$ 的不对称伸缩振动, 2848 cm^{-1} 为 $-\text{CH}_2-$ 的对称伸缩振动, 1470 cm^{-1} 附近为 $-\text{CH}_2-$ 的弯曲振动, 718 cm^{-1} 为 $-\text{CH}_2-$ 的摇摆振动^[7], 说明两者的基体均为聚乙烯。

但从两者谱图的对比分析可知, 老化开裂绝缘材料在 1720 cm^{-1} 附近的出峰比较尖锐, 1720 cm^{-1} 附近为羰基吸收峰, 羰基吸收峰是一系列羰基衍生物的吸收, 一般将交联聚乙烯谱带 1720 cm^{-1} 附近出现羰基吸收峰作为材料老化的判断依据^[8-10], 老

化开裂绝缘材料在 1720 cm^{-1} 的吸收峰明显高于未老化交联聚乙烯绝缘材料,说明开裂绝缘材料的老化程度较高。另外,未老化的交联聚乙烯绝缘材料在 1080 cm^{-1} 附近有明显的出峰,此为硅烷交联后形成的 Si—O—Si 键的特征吸收峰^[11-12],此处峰越强,说明 Si—O—Si 基团越多,交联反应越充分。而开裂绝缘材料在 1080 cm^{-1} 附近的峰不明显,说明老化开裂的绝缘材料交联程度很小。

2.3 TG 分析

未老化绝缘材料和老化绝缘材料的 TG 分析结果如图 6 所示。

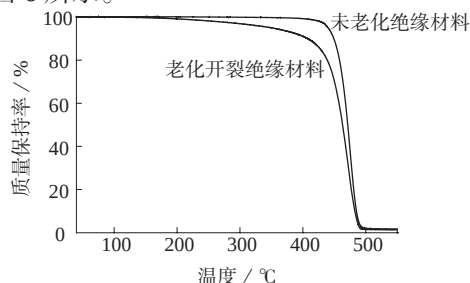


图6 未老化绝缘材料和老化绝缘材料的 TG 分析图

从图中可以看出,无论是老化后的绝缘材料还是未老化绝缘材料,均在 500°C 附近分解完全,说明老化后的绝缘材料中并未添加填料。另外,从曲线中可以看出,未老化绝缘材料在 400°C 前基本不发生失重,而老化后的绝缘材料在 400°C 之前就有较为明显的失重,质量保持率仅为 90.8%,这是因为老化后其分子链断裂,更容易发生热解反应。

2.4 DSC 分析

未老化绝缘材料和老化绝缘材料的 DSC 分析结果见图 7。从图 7 可知,未老化绝缘材料和老化绝缘材料的熔融温度 (T_m)、结晶峰宽度 (ΔT_c)、熔融焓 (ΔH_m) 如表 1 所示。

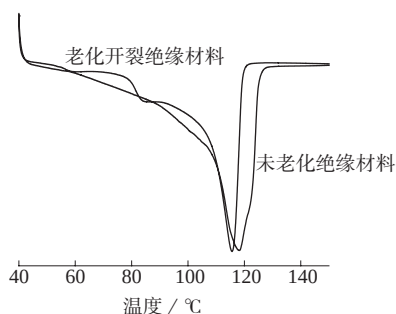


图7 未老化绝缘材料和老化绝缘材料的 DSC 图

表1 未老化绝缘材料和老化绝缘材料的熔融参数

样品	$T_m / ^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_c / ^{\circ}\text{C}$	$\Delta H_m / ^{\circ}\text{C}$
未老化绝缘材料	115	8.6	89.9
老化绝缘材料	118	14.4	126.9

老化开裂绝缘材料的熔融温度为 118°C ,未老

化绝缘材料的熔融温度为 115°C ,说明老化开裂绝缘材料的结晶度要高于未老化绝缘材料。未老化绝缘材料的熔融峰较为尖锐,结晶峰宽度为 8.6°C ,结晶速率较快,这是因为未老化绝缘材料的交联度较高,其交联副产物也增多,起到了异相成核的作用。而老化开裂绝缘材料的熔融峰则相对较宽,结晶峰宽度为 14.4°C ,说明老化开裂绝缘材料的结晶尺寸分布较宽。利用热分析软件 TA Universal Analysis 2000 对老化开裂绝缘材料和未老化绝缘材料的熔融峰进行线性积分,可得两者的熔融焓分别为 $126.9, 89.9\text{ J/g}$,说明老化开裂绝缘材料的结晶度较好。这是由于聚乙烯本身分子链较为规整,结晶能力较强,而对于硅烷交联聚乙烯料,其挤出成型前已完成分子链的接枝过程,大分子不易重排,限制了其结晶能力^[13-14]。因此结晶度和交联度存在着一定的对应关系,结晶度越好,意味着交联程度越低。

3 原因分析

聚乙烯经过交联后,形成了三维网状结构,分子之间的作用力也由分子链段之间的范德华力和物理缠结点,转变成以化学交联点为主,从而使分子链的解缠结和滑移受到很强的抑制^[15],表现出很强的耐环境应力开裂和耐老化性能。在电缆绝缘材料交联过程中,添加的交联剂含量过低,或者交联时间不足,交联工艺控制不当,都会造成绝缘交联度不足,从而影响其耐老化性能。

4 结论

通过对某 10 kV 线路末端低压架空电缆绝缘材料老化原因分析,得出以下结论和建议:

(1) FTIR 分析、TG 分析、DSC 分析等表明,开裂架空电缆绝缘材料的绝缘交联程度较低,耐老化性能和耐环境应力开裂性能较差。架空电缆的生产质量差是造成该架空电缆绝缘材料老化开裂的根本原因。

(2) 建议加强对架空电缆入网质量的检测,定期对在运架空电缆材料进行耐老化性能检测和评估,降低其安全运行风险。

参考文献

- [1] 周展刚. 架空电缆——一种新型的输电方式[J]. 武钢技术, 1992(3):60-63.
Zhou Zhangang. Overhead cable-a new type of transmission[J]. Wuhan Iron and Steel Corporation Technology, 1992(3):60-63.
- [2] 顾金, 钱忠, 沈阳, 等. 基于等温松弛电流法的架空绝缘架空电缆老化状况评估[J]. 浙江电力, 2018, 37(2):1-5.
Gu Jin, Qian Zhong, Shen Yang, et al. Aging Status assessment of overhead insulated lines based on isothermal relaxation current[J].

- Zhejiang Electric Power, 2018, 37(2):1-5.
- [3] 郑佩祥,林德源,韩纪层,等. LDXLPE 架空绝缘电缆失效有限元分析与改性研究[J]. 塑料科技, 2017, 45(7):47-52.
- Zheng Peixiang, Lin Deyuan, Han Jiceng, et al. Failure, finite element analysis and modification study on ldxlpe overhead insulated cables[J]. Plastics Science and Technology, 2017, 45(7):47-52.
- [4] 胡鹏,李成钢,陈大兵. 电缆 GIS 终端环氧套管开裂原因分析及对策研究[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1):102-105.
- Hu Peng, Li Chenggang, Chen Dabing. Cause analysis and countermeasure study of cracking accident of cable GIS terminal epoxy casing[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1):102-105.
- [5] 刘风华,刘腾宇,陈涛. 影响硅烷交联架空电缆热延伸性能的原因分析[J]. 电线电缆, 2006(2):23-25.
- Liu Fenghua, Liu Tengyu, Chen Tao. Analysis of the factors affecting the hot set property of overhead Si-XLPE insulated cables[J]. Electric Wire & Cable, 2006(2):23-25.
- [6] 李陈莹,李鸿泽,陈杰,等. 高压 XLPE 电力电缆缓冲层放电问题分析[J]. 电力工程技术, 2018, 37(2):61-66.
- Li Chenying, Li Hongze, Chen Jie, et al. Analysis of high voltage XLPE power cable buffer layer discharge problem[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(2):61-66.
- [7] 胡皆汉,郑学仿. 实用红外光谱学[M]. 北京:科学出版社, 2011.
- Hu Jiehan, Zheng Xuefang. Practical infrared spectroscopy[M]. Beijing:Science Press, 2011.
- [8] Kim C, Jian J Z, Pingkai J, et al. Investigation of dielectric behavior of thermally aged XLPE cable in the high frequency rang[J]. Polymer Testing, 2006, 25(4):553-561.
- [9] 李捍平,黄志鹏,李忠华. 交联聚乙烯电缆热老化与电树枝化相关性研究[J]. 江苏电机工程, 2009, 28(5):54-57.
- Li Hanping, Huang Zhipeng, Li Zhonghua. Research on correlation between thermal aging and electrical treeing of cross-linked polyethylene cable[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2009, 28(5):54-57.
- [10] 徐俊,王晓东,欧阳本红,等. 老化对交联聚乙烯电缆绝缘理化结构的影响[J]. 绝缘材料, 2013, 46(2):33-37.
- Xu Jun, Wang Xiaodong, Ouyang Benhong, et al. Effect of thermal aging on the physicochemical structure of XLPE cable insulation[J]. Insulating Materials, 2013, 46(2):33-37.
- [11] 刘玉飞,何敏,罗筑,等. 红外光谱法定量研究硅烷自然交联聚乙烯的结构演变[J]. 工程塑料应用, 2015, 43(5):97-100.
- Liu Yufei, He Min, Luo Zhu, et al. Quantitative research on structure evolution of silane natural cross-linked polyethylene by infrared spectrum[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(5):97-100.
- [12] 李志伟,金海云,张涛,等. 脱气时间对交联聚乙烯电缆绝缘材料聚集态结构与链结构的影响[J]. 西安交通大学学报, 2018, 54(4):15-23.
- Li Zhiwei, Jin Haiyun, Zhang Tao, et al. Effect of degassing time on aggregation structure and chain structure of XLPE cable insulation material[J]. Journal of Xi' An Jiao Tong University, 2018, 54(4):15-23.
- [13] 朱晓辉,杜伯学,高宇,等. 交联工艺对交联聚乙烯结晶形态的影响[J]. 绝缘材料, 2010, 43(6):44-47.
- Zhu Xiaohui, Du Boxue, Gao Yu, et al. Effects of cross-linking process on crystallinity of XLPE[J]. Insulating Materials, 2010, 43(6):44-47.
- [14] 李欢,李建英,马永翔,等. 不同温度热老化条件下交联聚乙烯电缆绝缘热性能和力学性能的劣化趋势研究[J]. 绝缘材料, 2018, 51(1):57-63.
- Li Huan, Li Jianying, Ma Yongxiang, et al. Degradation trend of thermal and mechanical properties of XLPE cable insulation thermal ageing at different temperatures[J]. Insulating Materials, 2018, 51(1):57-63.
- [15] 李运德,苑会林. 硅烷交联高密度聚乙烯结构和性能研究[J]. 工程塑料应用, 2002, 30(3):41-44.
- Li Yunde, Yuan Huilin. Study on the Structure and properties of silane-crosslinked HDPE[J]. Engineering Plastics Application, 2002, 30(3):41-44.
- (上接第 98 页)
- [15] Doğan F, Kaya İ, Bilici A. Azomethine-based phenol polymer : Synthesis, characterization and thermal study[J]. Synthetic Metals, 2011, 161(1-2):79-86.
- [16] Pitchaimari G, Vijayakumar C T. Studies on thermal degradation kinetics of thermal and UV cured *N*-(4-hydroxy phenyl) maleimide derivatives[J]. Thermochemica Acta, 2014, 575(1):70-80.
- [17] 袁慧萍,张腾,索红莉,等. 热致液晶聚酰胺的热分解动力学及寿命[J]. 高分子材料科学与工程, 2011, 27(4):32-36.
- Yuan Huiping, Zhang Teng, Suo Hongli, et al. Thermotropic liquid crystal polyamide thermal decomposition kinetics and life[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2011, 27(4):32-36.
- [18] Erceg M, Kovačić T, Klarić I. Dynamic thermogravimetric degradation of poly(3-hydroxybutyrate) / aliphatic-aromatic copolyester blends[J]. Polymer Degradation & Stability, 2005, 90(1):86-94.
- [19] Metzger J D. Role of endogenous plant growth regulators in seed dormancy of *avena fatua* : II. Gibberellins[J]. Plant Physiology, 1983, 73(3):791-795.
- [20] Naqvi S R, Uemura Y, Osman N, et al. Kinetic study of the catalytic pyrolysis of paddy husk by use of thermogravimetric data and the coats-redfern model[J]. Research on Chemical Intermediates, 2015, 41(12):1-13.
- [21] Yang Shaohui, Fu Peng, Liu Mingyong, et al. Synthesis, characterization of polytridecamethylene 2,6-naphthalamide as semiaromatic polyamide containing naphthalene-ring[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 118(2):1 094-1 099.