

文章编号: 1671-251X(2023)09-0167-11

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.18150

矿用三元乙丙橡胶高压电缆绝缘老化机理及状态评估技术研究进展

雷志鹏^{1,2,3}, 姜宛廷^{1,3}, 门汝佳^{1,3}, 张建花^{1,3}, 李媛媛^{1,3}, 何庆辉^{1,3}, 李蔚^{1,3}

(1. 太原理工大学 矿用智能电器技术国家地方联合工程实验室, 山西 太原 030024;

2. 晋能控股装备制造集团技术中心, 山西 晋城 048006;

3. 太原理工大学 煤矿电气设备与智能控制山西省重点实验室, 山西 太原 030024)

摘要: 绝缘被认为是电气设备中最薄弱的环节。煤矿特殊工况和电、热、机械应力等老化因子的共同作用,使矿用高压电缆的三元乙丙橡胶(EPDM)绝缘老化机理判定与状态评估存在很大的难度。针对煤矿用高压移动软电缆的EPDM绝缘,介绍了EPDM的基本性能和经受的老化因子类型。基于多老化因子作用下EPDM的理化性能、机械性能、电性能,分析了EPDM老化机理。综述了绝缘电阻、局部放电、介质损耗因数和温度等矿用高压电缆绝缘在线监测方法的基本原理和存在的问题。总结了矿用高压电缆绝缘状态评估方法研究现状,介绍了基于改进雷达图的多参量和基于介质损耗的单参量矿用高压电缆绝缘状态评估方法。为应对煤矿智能化发展,一方面矿用电气设备智能化需要在智能感知、智能控制方面开展研究,弥补状态感知环节和状态评估特征量缺失的问题;另一方面需要研究轻量化模型或算法,降低设备旁智能终端的计算复杂性、参数量和分析耗时,提高状态评估技术的可实施性,为实现智能分析和智能决策奠定基础。

关键词: 矿用高压电缆; 电缆绝缘; 三元乙丙橡胶; 绝缘状态评估; 绝缘老化机理; 多因子老化; 绝缘在线监测

中图分类号: TD611

文献标志码: A

Research progress on insulation aging mechanism and condition evaluation technology of mining EPDM high-voltage cables

LEI Zhipeng^{1,2,3}, JIANG Wanting^{1,3}, MEN Rujia^{1,3}, ZHANG Jianhua^{1,3}, LI Yuanyuan^{1,3}, HE Qinghui^{1,3}, LI Wei^{1,3}

(1. National and Provincial Joint Engineering Laboratory of Mining Intelligent Electrical Apparatus Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Jinneng Holding Shanxi Science and Technology Research Institute Co., Ltd. (Jincheng) Technology Centre, Jincheng 048006, China; 3. Shanxi Key Laboratory of Mining Electrical Equipment and Intelligent Control, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Insulation is considered the weakest link in electrical equipment. The combined effects of special working conditions in coal mines and aging factors such as electrical, thermal, and mechanical stresses make it difficult to determine the aging mechanism and evaluate the condition of EPDM insulation for high-voltage cables used in mines. This paper introduces the basic performance and aging factor types of EPDM insulation for high-voltage mobile flexible cables used in coal mines. Based on the physical, chemical, mechanical, and electrical

收稿日期: 2023-08-30; 修回日期: 2023-09-24; 责任编辑: 盛男。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51977137); 山西省自然科学基金项目(202103021224115); 山西省“1331”工程项目(晋教科(2017)10号)。

作者简介: 雷志鹏(1983—), 男, 山西太原人, 副教授, 博士, 主要研究方向为矿用智能电器和电气绝缘性能评估, E-mail: leizhipeng@163.com。

引用格式: 雷志鹏, 姜宛廷, 门汝佳, 等. 矿用三元乙丙橡胶高压电缆绝缘老化机理及状态评估技术研究进展[J]. 工矿自动化, 2023, 49(9): 167-177.

LEI Zhipeng, JIANG Wanting, MEN Rujia, et al. Research progress on insulation aging mechanism and condition evaluation technology of mining EPDM high-voltage cables[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(9): 167-177.



扫码移动阅读

properties of EPDM under the influence of multiple aging factors, the aging mechanism of EPDM is proposed. This paper summarizes the basic principles and existing problems of online monitoring methods for insulation resistance, partial discharge, dielectric loss factor, and temperature of mining high-voltage cables. The paper summarizes the current research status of insulation status evaluation methods for mining high-voltage cables. The paper introduces the evaluation methods for insulation status of multi parameter based on improved radar map and single parameter based on dielectric loss mining high-voltage cables. To cope with the development of coal mine intelligence, on the one hand, it is suggested to do research on intelligent perception and control of mining electrical equipment to compensate for the lack of state perception and state evaluation feature quantities. On the other hand, it is necessary to study lightweight models or algorithms to reduce the computational complexity, parameter quantity, and analysis time of intelligent terminals near devices. It improves the feasibility of state evaluation technology, and lays the foundation for achieving intelligent analysis and decision-making.

Key words: mining cables; cable insulation; EPDM; insulation status assessment; insulation aging mechanism; multi factor aging; insulation online monitoring

0 引言

我国是世界上发现、利用煤炭最早的国家,煤炭既是我国的主体能源,又是重要的化工原料。作为社会生产的基础能源,提高煤炭生产力、增大煤炭开采量以适应国民经济快速稳健的发展需求是必然趋势。在这种需求的推动下,目前煤矿井下最高电压等级已提升至 10 kV。而井下环境恶劣,地质条件复杂,这给煤矿井下电气设备带来了严峻考验。

矿用高压电气设备主要包括防爆电动机、干式变压器、高压开关、电缆等。电气设备中的绝缘材料被认为是最薄弱的环节^[1-2],其老化或破坏也是造成设备事故的主要原因。矿用高压防爆异步电动机绝缘结构采用少胶浸渍或多胶模压,线圈匝间绝缘采用环氧粉云母少胶(或中胶)带、聚酯薄膜补强云母带、聚酰亚胺薄膜等半叠包或平包而成,耐热等级为 F 级或 H 级^[3-4]。矿用干式变压器匝间绝缘材料以 Nomex 绝缘纸为主,层间绝缘为聚酰亚胺薄膜,相间绝缘为亚胺改性玻璃布板^[5]。矿用高压电缆绝缘以交联聚乙烯或三元乙丙橡胶(Ethylene Propylene Diene Monomers, EPDM)为主。这些绝缘及其结构受电、热、力、环境等因素影响,老化强度存在显著差异,使得建立绝缘的寿命模型进行寿命评估十分困难^[6]。特别是在煤矿综采工作面供电系统中,绝缘受到变频电压、热、机械力、潮湿等因素的共同影响,其绝缘老化机理判定与状态评估存在很大难度。

本文针对矿用高压电缆绝缘在多因子下的老化机理和状态评估问题,以煤矿井下用高压移动软电缆的绝缘——EPDM 为对象,重点阐述了 EPDM 基本性能、老化因子、多因子作用下老化机理,综述了矿用高压电缆绝缘在线监测方法,介绍了当前矿用

高压电缆绝缘状态评估方法,包括基于改进雷达图的绝缘老化状态评估方法和基于介质损耗的绝缘状态评估方法。

1 矿用高压电缆绝缘老化机理

我国井工煤矿供电系统中,电力电缆是唯一的井下输电线路。根据《煤矿安全规程》中煤矿井下各级配电电压和各种电气设备的额定电压等级规定,煤矿井下低压不超过 1.14 kV,高压不超过 10 kV。矿用高压电缆主要包括移动类软电缆和固定敷设电力电缆两大类。相较于固定敷设电力电缆,移动类软电缆的使用环境更加严酷,其不仅要随采掘设备频繁移动,承受各种拉拽和挤压,运行环境也多是在采掘工作面,还面临潮湿多水、负载多变、落煤挤压等问题。固定敷设电力电缆则与一般工业用相同电压等级电缆所面临的问题类似。以下重点讨论煤矿井下用移动软电缆(特别是 3.3~10 kV 等级)的绝缘老化机理。

1.1 EPDM 的基本性能

我国煤矿移动类高压电缆绝缘以 EPDM 为主,其基体是乙烯、丙烯和少量的非共轭二烯烃第三单体的共聚物。EPDM 由于含有残余的不饱和侧链,所以可以使用硫磺或催化剂进行交联。交联后的 EPDM 具有完全饱和的主链,形成网状结构,具有不溶解和不熔融特性,既表现出优异的抗氧化、耐臭氧、耐热、耐水和耐候特性,又能保留橡胶类材料固有的柔韧性。此外,EPDM 还具有优异的电绝缘性和耐电晕性,在低温下也能保证较好的稳定性。EPDM 基本性能见表 1。与交联聚乙烯相比,EPDM 的长期使用温度为 90 ℃,断裂伸长率约为 390%,应急过载温度可达 140 ℃(在应急过载温度下的运行

时间每年不超过 100 h, 在电缆整个生命周期中出现持续 100 h 的过载情况不应超过 5 次), 这也是 EPDM 成为煤矿采掘工作面高压电缆绝缘唯一选择的原因。

表 1 EPDM 基本性能
Table 1 Properties of EPDM

性能参数	值	性能参数	值
密度/(g·cm ⁻³)	0.86~0.87	断裂伸长率/%	390~420
丙烯含量/%	20~50	表面张力/(mN·m ⁻¹)	25~35
比热容/(kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	2.8	玻璃化温度/℃	-60~-50
热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.3	长期允许运行温度/℃	90
热扩散系数/(cm ² ·s ⁻¹)	0.0012	电阻率/(Ω·cm)	10 ¹⁵
抗张强度/MPa	7~24	相对介电常数	3~4
门尼黏度ML(1+4)100 ℃	30~120	介质损耗因数	0.2~0.8
闪点/℃	360	交流介电强度/(kV·mm ⁻¹)	30~40
自燃点/℃	370	直流介电强度/(kV·mm ⁻¹)	70~100

1.2 EPDM 老化因子

采煤过程中, 采煤机拖拽电缆运行工况最为恶劣, 时常出现故障, 且故障发生随机性较大, 常造成工作面无计划停产。采煤机拖拽电缆设计使用年限一般较短, 多数大功率拖拽电缆仅能保证使用寿命不低于 6 个月, 造成极大浪费。受运行工况影响, 采煤机拖拽电缆用 EPDM 绝缘的老化或故障形成原因有其特殊性。EPDM 往往同时遭受多种应力复合作用, 使其加速老化或形成缺陷, 引起漏电、短路或放电等故障, 将会导致人身触电、绝缘撕裂、电缆断线, 甚至电缆着火或瓦斯爆炸事故。

采煤机拖拽电缆经受的老化因子主要包括电因子、热因子和机械应力。

1) 电因子源于实际使用过程中的外加电场、缺陷局部放电、电缆终端的电晕放电等。由于拖拽电缆运行电压等级较低、绝缘余量足够(3.3 kV 拖拽电缆绝缘厚度一般不小于 3 mm), 正常情况下这些电场的作用并非引起采煤机拖拽电缆故障的主要原因, 所以电场单独作用时并不会引起绝缘的明显老化。然而, 当出现机械应力后, 将导致电缆绝缘局部电场和热场分布不均匀, 加速绝缘局部老化, 甚至导致绝缘击穿等故障迅速发生。

2) 热因子主要来自于大功率设备配套电动机频繁重载启停、缺陷放电、自身介质损耗大等产生的热量。

3) 机械应力来自于采煤机运行过程中受拉拽、磨损、过度弯曲、金属部件的挤压、落煤和研石的冲击等形成的拉伸力、弯曲应力、剪切力或挤压力

等。拉伸力来自拖拽电缆移动过程中大块研石或煤块压住电缆后采煤机给予的拉力、电缆夹被憋住或卡住时的拉力, 或倾斜工作面拖拽电缆自重形成的向下应力造成采煤机上行时给予拖拽电缆更大的拉力等。弯曲应力主要是电缆往返移动时电缆被折弯形成的应力, 严重时电缆会被折叠为 3 层, 造成绝缘中局部弯曲应力集中。剪切力或挤压力主要来自每一节电缆槽的挤压或剐蹭, 严重时会将整根电缆直接剪断, 或造成护套破损。外护套破损会显著影响电缆绝缘性能, 这是因为一般煤矿井下潮湿多水, 如果机械应力导致电缆护套破损, 水将浸入电缆, 加速电缆绝缘老化, 形成绝缘损坏。此外, 硫化热补修复后的拖拽电缆虽然可以再次使用, 但被修复部位直径大于电缆直径, 且柔韧性显著下降, 弯曲半径明显增大。实际使用中电缆既容易被电缆夹卡住, 又容易被过度弯曲, 造成局部机械应力集中。

综上可知, 采煤机拖拽电缆运行时, 绝缘将受到电、热和机械应力等因子的共同作用。

1.3 多因子作用下 EPDM 老化机理

针对多因子作用下矿用高压电缆用 EPDM 绝缘的老化机理, 国内已从理化性能、机械性能和电性能等方面开展了研究, 并初步掌握了 EPDM 老化机理。

电、热、机械应力作用下 EPDM 老化机理如图 1 所示。当热因子存在时, EPDM 存在热氧老化, 使其发生一系列化学反应, 造成 EPDM 的各项性能下降^[7-8]。EPDM 的热氧老化反应如图 2(a)所示, 对于 EPDM 分子结构, 其含有侧甲基的叔碳原子活性较大, 故氧化反应多发生在丙烯链段。叔碳原子在热氧作用下会脱氢形成氢过氧化物(ROOH), 导致氢过氧化物逐渐积累。当氢过氧化物积累到一定浓度后会分解形成烷氧自由基(ROO)和羰基(C=O)等, 起到自动催化效应, 各种含氧自由基彼此反应, 形成酯、醛、酮类等复杂结构, 使得亚甲基基团减少, 同时大分子链段之间发生交联。EPDM 在 120 ℃ 老化后的傅里叶变换红外(Fourier Transform Infrared Reflection, FTIR)谱图与未老化 EPDM 的对比如图 2(b)所示。可看出 EPDM 的 FTIR 谱图无明显变化, 没有明显的老化特征。然而, 当温度进一步升高后, EPDM 的 FTIR 谱图会在 1 715 cm⁻¹(酮基特征峰)和 1 730 cm⁻¹(酯基特征峰)出现明显的羰基吸收峰, 如图 2(c)所示。同时, 温度越高, 出现羰基特征峰的时间越早, 且随着老化时间的增加, 相应的吸收峰强度会增高, 表明羰基产物的含量也将逐渐增加^[9-10]。

各种羰基物质的形成不仅会使 EPDM 表面粗糙

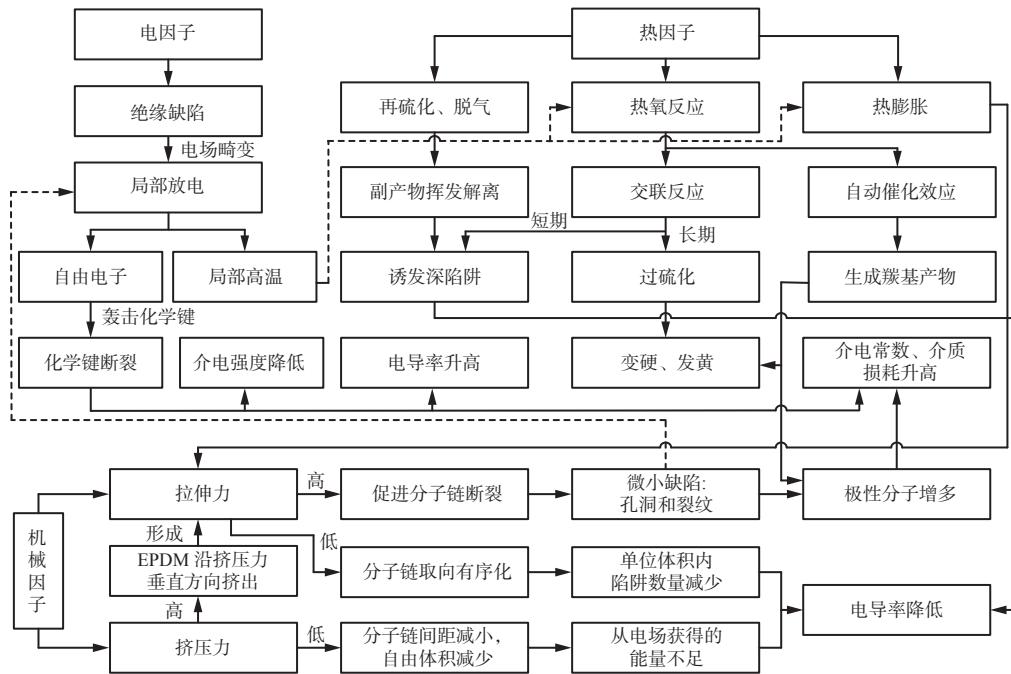
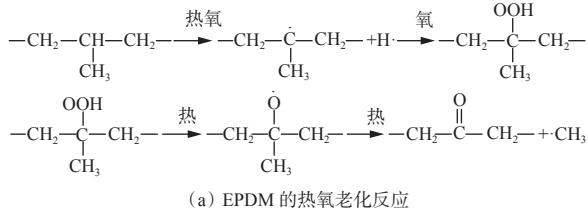


图 1 电、热、机械应力作用下 EPDM 老化机理

Fig. 1 Aging mechanism of EPDM under electrical, thermal, and mechanical stress



(a) EPDM 的热氧老化反应

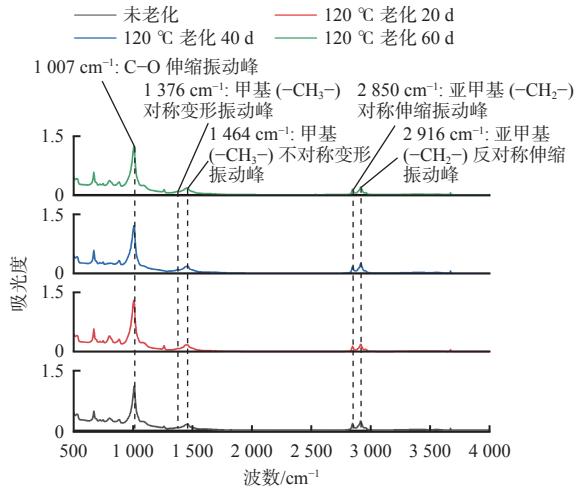


图 2 EBDM 的热氧化老化

度增加，内部产生孔洞和裂纹，表面颜色变红变黄，亮度增加(图3(a))，硬度升高(图3(b))，还会使其机械性能劣化，如断裂伸长率明显下降(图3(c))。因此，羰基指数常被用于评价EPDM性能。

EPDM 在热和拉力共同作用下老化后的碳基指数如图 3(d) 所示。可看出随着老化时间的增加，碳基指数均呈逐渐升高的趋势，且热因子和拉力越高，碳基指数升高越快。这也进一步表明，多因子老化会加速 EPDM 的分解，生成碳基类产物，形成缺陷。

机械应力的引入不仅会影响 EPDM 的理化和机械性能,也会影响电性能。例如:较低的挤压力作用会使 EPDM 中因老化或制造形成的微孔发生形变,并使 EPDM 分子间形成相对稳定的结合力,分子排列紧凑、活动能力减弱,分子断裂的能量阈值增加,EPDM 的介电强度和阈值场强反而会有一定程度提升。这也导致热因子对 EPDM 的影响减弱。虽然温度升高,EPDM 中的载流子浓度和迁移率均会升高,但是较低的挤压力使得分子链间的间距减小,自由体积减少,不利于电荷迁移,载流子迁移率急剧下降,且其下降速率远大于受温度影响的载流子浓度的升高速率,电导电流密度降低,电导率降低。当挤压力升高到一定程度后,沿挤压力垂直方向将产生一个拉力,使 EPDM 沿拉力方向挤出,加上热因子升高引起的 EPDM 膨胀,将使 EPDM 的结构遭到破坏,分子链断裂加剧,极性分子增多,EPDM 中将产生微裂纹,各种缺陷形成,载流子迁移率将迅速升高,电导率升高,如图 4 所示。

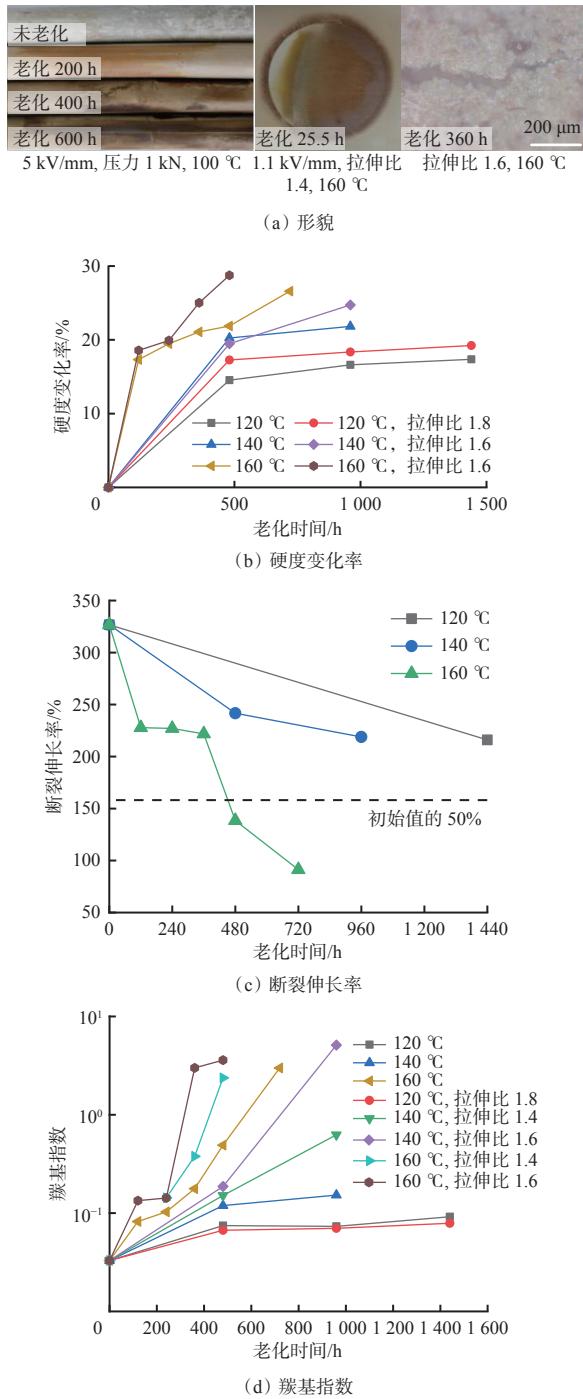


图 3 EPDM 老化后的理化和机械性能

Fig. 3 Physical and mechanical properties of aged EPDM

另一种会引起 EPDM 老化的机械应力是拉伸力。当作用于 EPDM 的外部拉伸力较小时, EPDM 处于弹性形变, 拉伸形变不会破坏 EPDM 分子链的结构, 反而因为拉伸之后分子链从蜷缩状态变为沿拉伸方向的伸展状态, 分子链取向趋于有序化, 分子链间距增大, 单位体积内陷阱数量减少, 电子和空穴的迁移受限, 导致极性基团活性和电导电流下降。从宏观上直接表现为 EPDM 的极化/去极化电流随拉伸比的增加而降低, 极化强度减弱。如

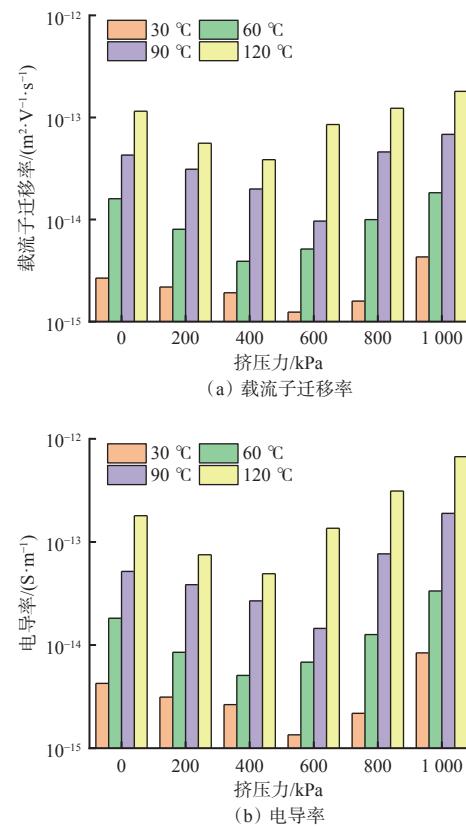


图 4 EPDM 的电导特性

Fig. 4 Conduction properties of EPDM

图 5 所示, 拉伸力较高时, EPDM 的形变将超出其可承受的弹性范围, EPDM 内部弱键部位分子链发生断裂, 极性分子增多, 且分子链相互之间受到的束缚减小, 分子的转向极化在电场的作用下会变得更容易, 极化过程更容易建立, 极化强度增大, 更多的陷阱出现, 可以促进电子的跳跃, 极化/去极化电流升高, 电导率也升高^[11]。

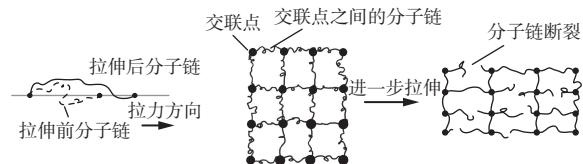


图 5 EPDM 分子链网络拉伸

Fig. 5 EPDM molecular chain network stretching

当热因子和拉伸力同时存在, 且温度在硫化温度以下时, 老化初期 EPDM 处于交联反应和断链反应相互竞争的状态, 但交联反应占据主导。EPDM 出现“再脱气”过程, 发生硫化反应, 使得分子链间的交联网络进一步完善, 橡胶主分子链增加, 表现为硬度快速上升, 各官能团数量下降速率较慢, 这一阶段 EPDM 自身分子结构还未发生降解, 而其内部的添加剂、硫化副产物及杂质等受热的作用进一步挥发、解离, 形成的载流子在电场作用下发生碰撞、复合, 诱发了较深的陷阱。随着老化时间的增

加, 拉伸力的作用突显, 这是因为拉伸力一方面抑制了交联反应, 促进了断链反应, 另一方面拉伸力的作用使空隙增大, 促进了氧化反应, 加速了热氧老化的进程。宏观上表现为 EPDM 的硬度、羰基指数、直流电导率均增大, 且活化能降低。当温度超过硫化温度以后, EPDM 会发生热裂解反应, 加之拉伸力的共同作用, 导致分子链快速断裂, 羰基产物增多, EPDM 性能快速劣化, 缺陷增多, 变脆变硬, 损耗升高, 导电机制发生变化, 在较低的电场强度下即会發生击穿^[12]。

2 矿用高压电缆绝缘在线监测方法

我国电气设备绝缘在线监测技术虽发展迅速, 但与煤矿以外的领域相比, 矿用电气设备绝缘在线监测技术仍相对落后。这不仅是因为煤矿电气设备运行电压低、绝缘裕度高而不被重视, 而且矿井环境恶劣, 运行工况特殊, 有防爆要求, 监测难度大, 限制了各种监测技术的应用。目前矿用电气设备绝缘仍以人工目视、定期测量绝缘电阻或漏电流、在线监测温度为主, 无法满足煤矿装备数智化转型升级的技术要求^[13-14]。

2.1 绝缘电阻监测方法

绝缘电阻是衡量电缆对地绝缘水平高低的关键参数, 它与电导率、泄漏电流相同, 其大小可以直接反映电缆绝缘的好坏。绝缘电阻在线监测方法有直流叠加法、交流叠加法^[15-16]、电桥法^[17]、接地线电流法、阻抗法等。直流叠加法在线监测绝缘电阻的原理如图 6 所示。该方法通过电抗器 GPT 将 10~50 V 的直流电压叠加到电缆的交流工作电压上, 然后测量流经电缆地线的直流电流, 即可计算出电缆三相的绝缘电阻之和。

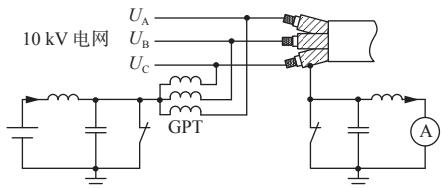


图 6 绝缘电阻监测原理

Fig. 6 Principle of insulation resistance monitoring

我国煤矿已有使用+48 V 电压的直流叠加法测量绝缘电阻的经验。在使用直流叠加法测量绝缘电阻时, 所测直流可能达到 nA 级别, 为满足数字化要求, 不仅需要模数转换器, 而且需要利用电子放大技术才能完成测量, 此时应保证放大器的输入阻抗至少大于所要测量绝缘电阻的 100 倍, 且电缆绝缘外护套的电阻也应远大于所测绝缘电阻。绝缘电阻测

量过程的时间常数较大, 需要数分钟才能完成 1 次测量。整个测量过程还极易受外界干扰和杂散电流的影响, 此时可以改变所叠加直流电压极性, 测量 2 次, 消除流经地线的干扰和杂散电流。

交流叠加法和电桥法原理与直流叠加法类似。交流叠加法一般是叠加幅值较低的低频电压(不高于 10 Hz), 测量电缆地线中的低频电流后, 分离出与所施加电压同相位的阻性电流分量, 求出绝缘电阻值。电桥法则是在直流叠加法的基础上, 将电缆绝缘作为高压桥臂, 电抗器与交流接地器和电阻(与电缆绝缘电阻值相近)连接, 构成与绝缘并联的桥臂实现测量。

接地线电流法是使用 pA 或 nA 级电流表直接测量流经电缆地线的电流。该方法与交流叠加法存在类似的问题, 因所测交流电流很小, 对电流表的最小测量范围有很高的要求。目前可用的电磁式微电流传感器可以实现 μA 级电流测量^[18]。

阻抗法则是测量流经电缆首端和末端的电压和电流波形, 然后根据电缆分布式参数等值电路模型, 计算出绝缘对地电阻。

2.2 局部放电监测方法

局部放电是监测电缆绝缘整体情况和局部缺陷(如绝缘中的电树枝、杂质、气隙等)的最常用方法。矿用高压电缆可以使用的局部放电在线监测方法较多, 包括耦合电容法、脉冲电流法、电磁波法和声波法等, 其中基于高频电流互感器(High Frequency Current Transformer, HFCT)的脉冲电流法在矿用高压电缆局部放电在线监测中已有应用。HFCT 的检测原理: 当电缆内部有局部放电发生时, 会在与之相连的回路中产生脉冲电流, 因此在电缆导线和接地线中都可以检测到局部放电信号^[19]。基于脉冲电流法的局部放电监测如图 7(a)所示。矿用高压电缆各相的金属屏蔽层相互连接, 为区分每一相的局部放电, 可以将 HFCT 直接安装在电缆线芯绝缘上, 但此时应注意避免负载电流过高引起 HFCT 饱和。

此外, 基于电磁波法的特高频(Ultra High Frequency, UHF)局部放电检测技术(数百兆赫兹)和瞬态地电压(Transient Earth Voltage, TEV)局部放电检测技术(数千赫兹到数十兆赫兹)在我国也已快速发展。这两种方法均是根据发生局部放电时, 每一个放电脉冲都会向四周辐射电磁波的特性, 直接测量周围环境中的电磁波或电磁波在金属壳体上产生的瞬态地电压, 从而实现局部放电监测, 如图 7(b)所示。然而这两种测量方法仅适合于电缆接头或终端处的局部放电测量。

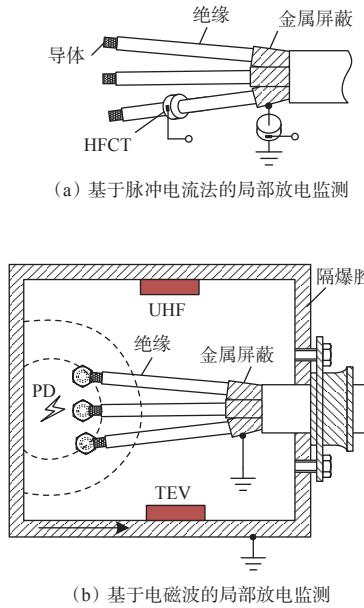


图 7 局部放电监测方法原理

Fig. 7 Principle of partial discharge monitoring method

2.3 介质损耗因数监测方法

介质损耗因数可描述绝缘极化和局部放电等现象引起的损耗, 反映电缆绝缘整体劣化程度^[20]。介质损耗因数监测原理如图 8 所示^[21]。通过电压互感器 PT 获取施加于电缆的电压信号, 电流互感器 CT 测量流过绝缘的工频电流信号, 然后经硬件电路分相处理或经傅里叶变换, 即可得到介质损耗因数。受限于矿用高压电缆绝缘屏蔽层连通, 以及电流互感器 CT 的最小可测量范围, 目前还未有介质损耗因数测量法在矿用高压电缆在线监测中的现场应用。

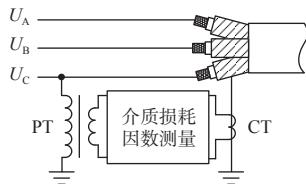


图 8 介质损耗因数监测原理

Fig. 8 Principle of dielectric loss factor monitoring

2.4 温度监测方法

温度监测不仅可以监视绝缘运行温度, 而且可以确定电缆的载流量是否安全, 因此应用广泛。电缆线芯温度测量包括点测^[22]和分布式测量^[23]2类。矿用高压电缆线芯温度在线监测多使用点测法, 即热电阻贴于接线腔内的绝缘外表面, 然后根据环境温度计算出电缆线芯温度。

$$T_c = T_s + \frac{W_i}{4\pi k(r_2^2 - r_1^2)} \left(r_2^2 - r_1^2 - 2r_2^2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right) + \frac{q_s}{2\pi k} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (1)$$

式中: T_c 为电缆线芯温度; T_s 为绝缘层外表面温度; W_i 为绝缘的介质损耗; k 为空气的导热系数; r_1 和

r_2 分别为绝缘层内、外半径; q_s 为绝缘层外表面的传热速率。

2.5 其他监测方法

分布式光纤监测方法已经成熟, 可以实现对电缆温度和应力的分布式监测, 但是这种方法受限于光纤较差的柔韧性, 并未在采掘工作面高压移动软电缆领域应用, 因此本文未展开介绍。

另一种较成熟的电缆线芯温度监测方法是无源无线温度测量传感器, 其采用电磁线圈从电缆取电, 驱动 CC1310 无线低功耗 MCU, 采集 NTC(Negative Temperature Coefficient, 负温度系数)传感器的信号, 实现温度的无源无线监测, 如图 9 所示。

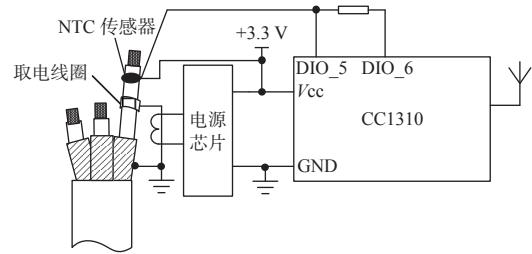


图 9 无源无线温度监测原理

Fig. 9 Principle of passive wireless temperature monitoring

此外, 频域反射法(阻抗谱法)也被用于电缆绝缘缺陷检测, 其本质是利用电缆分布式传输模型, 对电缆注入频率在数千赫兹到数百兆赫兹的电压, 得到阻抗相位、诊断函数、信号能量等参数沿电缆的变化情况, 从而得出电缆的老化、受潮、屏蔽层腐蚀等缺陷。但该方法目前仍未有在线监测的方案, 且易受各种反射信号的干扰, 有待进一步研究^[24-26]。

3 矿用高压电缆绝缘状态评估

随着在线监测、故障诊断和寿命评估等技术在矿用电气设备运维中逐渐应用, 针对矿用高压电缆绝缘状态的分析方法正在从定期巡检向状态维修和预测性维护转变^[20]。矿用高压电缆绝缘状态评估方法多基于局部放电测量数据或相角解析图^[27], 并辅以卷积神经网络^[28]、粒子群算法^[29]、可拓理论^[30]、模糊神经网络^[31]、稀疏分解^[32]、深度森林^[33]等智能算法, 实现了对电树枝、气隙、划痕、电痕、外力挤压等故障的评估。

除单一的基于局部放电的绝缘状态评估以外, 其他方法则是将多个参量进行融合, 然后综合评价绝缘的状态。如基于雷达图法的矿用高压电缆安全预警方法, 将局部放电量、接地电流、介质损耗、绝缘电阻、负荷水平、空气湿度等作为雷达图指标集, 并引入反映优劣程度的参考样本和多源信息互补的均衡度因子, 给出 4 级预警等级^[34]。此外, 基于介电

响应法和绝缘理化性能,给出了基于断裂伸长率、碳基指数、老化因子、界面极化弛豫强度、介质损耗积分饱和值等参量的矿用高压电缆用 EPDM 老化寿命评价方程^[20, 35-38],为进一步研究矿用高压电缆绝缘状态评估方法奠定了基础。下面以改进雷达图和介质损耗 2 种方法为例,介绍当前煤矿井下用移动软电缆绝缘状态评估方法。

3.1 基于改进雷达图的老化状态评估

雷达图法是典型的图形评价方法,其最大的特点是形象、直观。针对煤矿井下用移动软电缆绝缘老化状态,可以选择硬度 H 、介质损耗因数最大值 $\tan \delta_{\max}$ 、碳基指数 I_{CI} 、去极化电荷量特征值 $A_3\tau_3$ (A_3 为晶态与非晶态之间界面极化的拟合系数, τ_3 为晶态与非晶态之间界面极化的拟合时间常数)、极化指数 I_{PI} 等与绝缘老化密切相关的参数作为评价指标^[39-40]。然后使用层次分析法得到主观权重、客观权重和综合权重,并将综合权重映射为雷达图的各项指标角度,从而得到改进的雷达图,如图 10 所示。可看出不同老化程度时改进雷达图的面积有明显区别,因此可以提取改进雷达图的面积来定量 EPDM 绝缘的老化程度。此时可选用断裂伸长率作为基准,得到改进雷达图的面积达到整个图的 61.8% 时,EPDM 的绝缘性能失效。

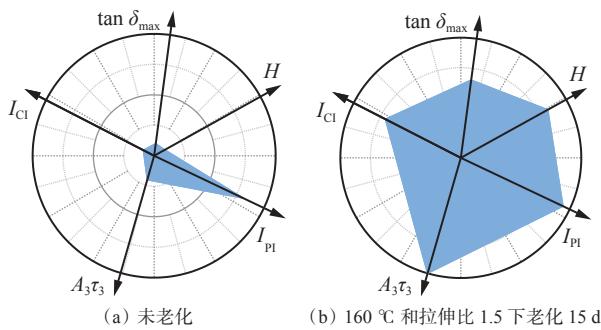


图 10 老化前后 EPDM 的改进雷达图

Fig. 10 Improved radar map of EPDM and aged EPDM

3.2 基于介质损耗的状态评估

假设 EPDM 的介电响应函数服从 Curie-von Schwidler 模型,则可利用傅里叶变换对极化/去极化电流进行时域到频域的转换,由此得到绝缘在频率为 0.1 Hz 时的极化总损耗因数 $\tan \delta_p$ 和去极化总损耗因数 $\tan \delta_{dp}$,以及低频介质损耗因数不对称系数 K 。

$$K = \frac{\tan \delta_{dp}}{\tan \delta_p} \quad (2)$$

然后,基于不同老化程度下得到的极化总损耗因数和去极化总损耗因数绘制基于损耗因数不对称系数的 EPDM 绝缘状态评价图。典型的电、热、挤

压力老化后得到的 EPDM 绝缘状态评价结果如图 11 所示。根据 GB/T 12972.1—2008《矿用橡套软电缆第 1 部分:一般规定》,3.6/6 kV 及以上矿用橡套软电缆经受试验电压后介质损耗因数 $\tan \delta$ 应不大于 0.035。如以此为阈值对 EPDM 绝缘状态评价图进行区域划分: $\tan \delta < 0.035$ 时认为绝缘相对良好; $0.035 < \tan \delta < 0.1$ 时认为绝缘轻微老化; $\tan \delta > 0.1$ 时认为绝缘严重老化^[37, 41]。

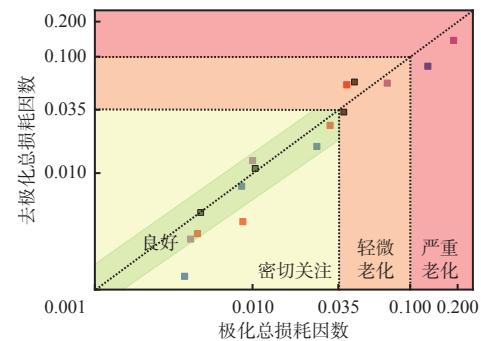


图 11 EPDM 绝缘状态评估

Fig. 11 Evaluation of EPDM insulation condition

将实际测得的 $\tan \delta$ 代入图 11,如 $\tan \delta < 0.035$ 且 $K \approx 1$,则优先推断 EPDM 绝缘良好,否则,认为绝缘老化程度值得重视和后续测试。当 $\tan \delta > 0.035$ 时,不对称系数对绝缘性能变化趋势的灵敏度有所下降,可忽略不对称系数,认为 $0.035 < \tan \delta < 0.1$ 时绝缘轻微老化, $\tan \delta > 0.1$ 时绝缘老化较为严重。

为应对煤矿智能化发展,矿用电气设备智能化不仅需要在智能感知、智能控制方面开展研究,更需要实现智能分析和智能决策,以上这些方法为矿用 EPDM 高压电缆绝缘状态智能分析提供了一定的借鉴。然而,现有方法评价的准确率很大程度上依赖于特征量的提取和处理,特征量越多,需要的矩阵运算量越大,加之对于一些偶发的异常信号要求有快速的响应速度,即能够实时处理数据,因此从准确率和实时性来说,未来分析和决策应能在设备旁就地实现,以弥补海量数据向云端传输时带来的信道堵塞和算力消耗。轻量化模型和算法的本质是在较少的特征参数下,通过占用较低的计算量分析数据,实现状态评估。目前已有轻量级故障诊断方法在电气设备诊断方面的初步研究^[42]。轻量化模型和算法一般基于卷积神经网络,如一种基于深度-广度联合剪枝的局部放电轻量化诊断方法,在保证高识别能力的基础上,使用较少的参数量,消耗 0.9 MiB 的存储和 12.89 MiB 的内存,即可将推理速度最大提高 9.3 倍^[43]。因此,轻量化模型和算法为设备旁智能终端上实现分析和决策提供了可能。降低计算复杂

性、参数量和分析耗时,是实现煤矿电气设备智能化需要重点研究的内容之一。

4 结论

1) 在电、热、机械应力作用下,矿用高压电缆用EPDM的绝缘性能会加速劣化。热因子引起热氧反应,机械应力引发分子断裂,使EPDM中出现羰基产物和微小的孔洞、裂纹等缺陷,导致EPDM发黄、变硬、变脆,电导率升高,击穿场强降低。因此,可将羰基指数、硬度、断裂伸长率、电导率、介质损耗因数、局部放电等特征量作为评价EPDM老化的指标。

2) 电缆绝缘在线监测技术虽已日趋成熟,但是在煤矿井下仍未得到广泛推广或应用,未来绝缘电阻、介质损耗、局部放电和温度等在线监测技术应与煤矿特殊工况和绝缘老化机理紧密结合,探索适用于煤矿的电气设备绝缘在线监测和状态感知技术。

3) 随着煤矿物联网和智能化的发展,智能分析或评价作为煤矿装备智能化转型升级的关键一环,除需要利用大数据技术实现电气设备绝缘的故障诊断和寿命预测以外,还需要研究轻量化模型或算法,使单一电气设备评价参数量不断减少的同时,兼具高准确性和易实施性。

参考文献(References):

- [1] 雷清泉. 谈谈对绝缘电介质的模糊认识——从事此领域五十年后的体会与深度迷茫[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2016, 37(1): 1-4.
LEI Qingquan. Understanding of insulated dielectrics: experience and confusion after being engaged in dielectric research for fifty years[J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2016, 37(1): 1-4.
- [2] CAI Li, LIN Jingdong, LIAO Xiaoyong. Residual life prediction of marine EPR cable under discontinuous operation[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(25): 6306-6311.
- [3] 顾永辉. 煤矿电工手册 电工基础与电机电器(上)[M]. 3 版. 北京:煤炭工业出版社, 2015.
GU Yonghui. Coal mine electrical manual electrical basics and electrical appliances[M]. 3rd ed. Beijing: Coal Industry Press, 2015.
- [4] 杜协和, 陈求索, 王健, 等. 10 kV 防爆电机定子绕组匝间绝缘结构研究[J]. 绝缘材料, 2020, 53(10): 51-54.
DU Xiehe, CHEN Qiusuo, WANG Jian, et al. Study on interturn insulation structure of stator winding for 10 kV explosion-proof motor[J]. Insulating Materials, 2020, 53(10): 51-54.
- [5] 温敏敏, 田慕琴, 宋渊, 等. 干式变压器用 Nomex 绝缘纸老化规律及其可靠性分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3430-3437.
WEN Minmin, TIAN Muqin, SONG Yuan, et al. Aging law and reliability analysis of Nomex paper used for dry-type transformer insulation[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11): 3430-3437.
- [6] 雷志鹏. 乙丙橡胶绝缘介电性能及其气隙和沿面放电机理的研究[D]. 太原:太原理工大学, 2015.
LEI Zhipeng. Dielectric properties of EPR and partial discharge mechanism occurring in cavities and along surface of EPR[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015.
- [7] 赵泉林, 李晓刚, 高瑾. 三元乙丙橡胶的人工气候老化[J]. 北京科技大学学报, 2008, 30(12): 1422-1427.
ZHAO Quanlin, LI Xiaogang, GAO Jin. Artificial weathering of ethylene-propylene-diene monomer (EPDM) rubber[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2008, 30(12): 1422-1427.
- [8] ZHOU Lijun, LIU Cong, QUAN Shengwei, et al. Experimental study on ageing characteristics of electric locomotive ethylene propylene rubber cable under mechanical-thermal combined action[J]. High Voltage, 2022, 7(4): 792-801.
- [9] 李志辉. 三元乙丙橡胶老化研究[D]. 厦门:厦门大学, 2018.
LI Zhihui. Study on the aging of ethylene-propylene-diene monomer[D]. Xiamen: Xiamen University, 2018.
- [10] MEN Rujia, LEI Zhipeng, SONG Jiancheng, et al. Effect of thermal ageing on space charge in ethylene propylene rubber at DC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(3): 792-800.
- [11] 李蔚, 何庆辉, 门汝佳, 等. 电缆绝缘用三元乙丙橡胶在拉伸状态下的介电频谱分析[J]. 绝缘材料, 2023, 56(7): 40-45.
LI Wei, HE Qinghui, MEN Rujia, et al. Dielectric spectrum analysis of ethylene propylene diene monomer for cable insulation under tensile stress[J]. Insulating Materials, 2023, 56(7): 40-45.
- [12] 何庆辉, 李蔚, 门汝佳, 等. 拉伸比对乙丙橡胶极化-去极化电流和陷阱分布的影响[J]. 绝缘材料, 2023, 56(6): 28-33.
HE Qinghui, LI Wei, MEN Rujia, et al. Influence of tensile ratio on PDC and trap distribution of EPDM[J]. Insulating Materials, 2023, 56(6): 28-33.
- [13] 金智新, 闫志蕊, 王宏伟, 等. 新一代信息技术赋能煤矿装备数智化转型升级[J]. 工矿自动化, 2023, 49(6): 19-31.
JIN Zhixin, YAN Zhirui, WANG Hongwei, et al. The new generation of information technology empowers the

- digital and intelligent transformation and upgrading of coal mining equipment[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(6): 19-31.
- [14] 王国法, 杜毅博, 陈晓晶, 等. 从煤矿机械化到自动化和智能化的发展与创新实践——纪念《工矿自动化》创刊 50 周年[J]. 工矿自动化, 2023, 49(6): 1-18.
WANG Guofa, DU Yibo, CHEN Xiaojing, et al. Development and innovative practice from coal mine mechanization to automation and intelligence: Commemorating the 50th anniversary of the founding of Journal of Mine Automation[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(6): 1-18.
- [15] 王福忠, 董鹏飞, 董秋生, 等. 煤矿 6 kV 动力电缆绝缘在线监测系统研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(9): 1398-1405.
WANG Fuzhong, DONG Pengfei, DONG Qiusheng, et al. Research on online monitoring system of coal mine 6 kV power cable insulation[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(9) : 1398-1405.
- [16] 娄建华, 李盼, 王洁, 等. 用于煤矿电缆绝缘参数在线测量的附加低频信号源设计[J]. 工矿自动化, 2012, 38(10): 51-54.
LOU Jianhua, LI Pan, WANG Jie, et al. Design of additional low-frequency signal source for online measurement of insulation parameters of coal mine cable[J]. Industry and Mine Automation, 2012, 38(10): 51-54.
- [17] 孙晓斐, 宋建成, 雷志鹏, 等. 基于电桥法的煤矿高压电缆绝缘电阻在线监测[J]. 煤矿安全, 2014, 45(2): 82-85.
SUN Xiaofei, SONG Jiancheng, LEI Zhipeng, et al. Insulation resistance on-line detection of coal mine high voltage cable based on DC bridge method[J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(2): 82-85.
- [18] 王文, 乔记平, 岑伶艳, 等. 泄漏电流测量用高精度电磁式微电流传感器的研制[J]. 仪表技术与传感器, 2016(12): 13-16, 56.
WANG Wen, QIAO Jiping, LIN Lingyan, et al. High precision electromagnetic micro current sensor used to measure leakage current[J]. Instrument Technique and Sensor, 2016(12): 13-16, 56.
- [19] 雷志鹏, 宋建成, 孙晓斐, 等. 矿用高压电缆局部放电测量传感器的研究及应用 [J]. 煤炭学报, 2013, 38(12): 2265-2271.
LEI Zhipeng, SONG Jiancheng, SUN Xiaofei, et al. Research and application of high-frequency current transformers for partial discharge measurement of mining cables[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(12): 2265-2271.
- [20] 雷志鹏, 李蔚, 何庆辉, 等. 基于介电响应法的矿用电缆绝缘性能评估方法研究[J]. 工矿自动化, 2023, 49(1): 46-55.
LEI Zhipeng, LI Wei, HE Qinghui, et al. Study on evaluation method of insulation performance of mine cable based on dielectric response method[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(1): 46-55.
- [21] 丁伟民, 许春雨, 宋建成. 一种矿用高压电缆介质损耗在线检测系统的设计[J]. 工矿自动化, 2010, 36(7): 9-12.
DING Weimin, XU Chunyu, SONG Jiancheng. Design of an on-line detecting system for dielectric loss of mine-used high-voltage cable[J]. Industry and Mine Automation, 2010, 36(7): 9-12.
- [22] 齐建伟, 宋建成. 矿井高压电缆接头温度在线监测系统的研究[J]. 工矿自动化, 2009, 35(12): 32-34.
QI Jianwei, SONG Jiancheng. Research of on-line monitoring system for temperature of high-voltage cable joint of mine[J]. Industry and Mine Automation, 2009, 35(12): 32-34.
- [23] 滑增涛. 矿井关键负荷供电电缆温度场分析与安全状态监测预警系统研制[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2022.
HUA Zengtao. Analysis of temperature field of power supply cables for key loads in mines and development of monitoring and early warning system for safety status[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2022.
- [24] 李蓉, 周凯, 饶显杰, 等. 基于输入阻抗谱的电缆故障类型识别及定位[J]. 高电压技术, 2021, 47(9) : 3236-3245.
LI Rong, ZHOU Kai, RAO Xianjie, et al. Identification and location of cable faults based on input impedance spectrum[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9) : 3236-3245.
- [25] 单秉亮, 李舒宁, 程俊华, 等. XLPE 配电电缆热老化段和集中性缺陷的辨识与定位[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(23): 8231-8241.
SHAN Bingliang, LI Shuning, CHENG Junhua, et al. Distinguishing and locating thermal aging segments and concentration defects in XLPE distribution cables[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(23): 8231-8241.
- [26] 饶显杰, 徐忠林, 龙林, 等. 基于频域反射法的电缆缺陷时域诊断特征波形 [J]. 电网技术, 2023, 47(8): 3483-3493.
RAO Xianjie, XU Zhonglin, LONG Lin, et al. Cable defect time domain diagnostic characteristic waveform based on frequency domain reflection[J]. Power System Technology, 2023, 47(8): 3483-3493.
- [27] 朱昊哲. 基于局部放电的矿用高压电缆绝缘在线监测系统研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2020.
ZHU Haozhe. An online insulation monitoring system based on partial discharge for mine high voltage cable[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2020.
- [28] 李峰. 基于卷积神经网络的矿用电缆局部放电模式识别[D]. 郑州: 中国矿业大学, 2020.

- 别[D]. 西安: 西安科技大学, 2020.
- LI Feng. Partial discharge pattern recognition of mining cable based on convolutional neural network[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020.
- [29] 郭秀才, 刘冰冰, 王力立. 基于小波包和 CS-BP 神经网络的矿用电力电缆故障诊断[J]. 计算机应用与软件, 2021, 38(9): 105-110.
- GUO Xiucui, LIU Bingbing, WANG Lili. Fault diagnosis of mining power cable based on wavelet packet and CS-BP neural network[J]. Computer Applications and Software, 2021, 38(9): 105-110.
- [30] 崔晓慧. 基于分形特征和统计特征的矿用高压电缆人工缺陷局部放电模式识别方法的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2014.
- CUI Xiaohui. Pattern recognition of partial discharge based on fractal features and statistical features regarding mine high voltage cables with artificial defects[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2014.
- [31] 冯晨. 基于绝缘电阻的电缆用乙丙橡胶绝缘表面电痕故障诊断方法研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
- FENG Chen. Study on surface electrical tracking fault diagnosis of the cable used ethylene propylene rubber based on insulation resistance[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016.
- [32] 雷志鹏, 宋建成, 曾君湘, 等. 基于稀疏分解的矿用 XLPE 电缆绝缘电树枝生长阶段识别方法: CN201711289843.8[P]. 2022-03-15.
- LEI Zhipeng, SONG Jiancheng, ZENG Junxiang, et al. Recognition method of electrical tree propagation stage for the insulation of mining XLPE cables based on the sparse representation theory: CN201711289843.8[P]. 2022-03-15.
- [33] 王科, 项恩新, 曹伟东, 等. 基于图像特征和深度森林的乙丙橡胶电缆绝缘老化状态识别[J]. 电测与仪表, 2022, 59(6): 32-36.
- WANG Ke, XIANG Enxin, CAO Weidong, et al. Identification of aging state of EPR cable insulation based on image feature and deep forest[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(6): 32-36.
- [34] 李海英, 李玄, 宋建成. 基于雷达图法的矿用高压电缆安全预警模型 [J]. 煤炭学报, 2012, 37(11): 1941-1946.
- LI Haiying, LI Xuan, SONG Jiancheng. Early safety warning model for mining HV cable based on radar chart method[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(11): 1941-1946.
- [35] LIN Lingyan, LIN Chen, GENG Pulong, et al. Aging life evaluation of coal mining flexible EPR cables under multi-stresses[J]. IEEE Access, 2020, 8: 53539-53546.
- [36] 门汝佳, 雷志鹏, 斋伶艳, 等. 矿用乙丙橡胶电缆绝缘电热老化状态评估[J]. 工矿自动化, 2019, 45(4): 67-71.
- MEN Rujia, LEI Zhipeng, LIN Lingyan, et al. Insulation state assessment of mine-used ethylene propylene rubber cable under electro-thermal aging[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(4): 67-71.
- [37] LEI Zhipeng, HE Qinghui, FABIANI D, et al. Dielectric loss of EPDM insulation subjected to thermal stress and pressure[J]. IEEE Access, 2022, 10: 129139-129148.
- [38] MENG Xiaokai, WANG Zhiqiang, LI Guofeng. Nondestructive condition assessment techniques for the ethylene-propylene rubber cable[J]. Research in Nondestructive Evaluation, 2017, 28(1): 45-59.
- [39] 何庆辉. 采煤机电缆用乙丙橡胶绝缘的多应力老化机理及性能评估方法研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2023.
- HE Qinghui. Research on multi-stresses aging mechanism and performance evaluation method of EPDM insulation for shearer cables[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2023.
- [40] ZHOU Kai, YUAN Hao, LI Yuan, et al. Assessing aging status and type of XLPE cable insulation with a graphic approach based on PDC measurement[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(6): 5114-5123.
- [41] 刘洋. 力热应力作用下采煤机拖拽电缆用乙丙橡胶绝缘性能及失效机理研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2021.
- LIU Yang. Investigation on insulation performance and failure mechanism of EPR for coal cutter's cable under thermal and mechanical stresses[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021.
- [42] WANG Yanxin, YAN Jing, SUN Qifeng, et al. A mobilenets convolutional neural network for GIS partial discharge pattern recognition in the ubiquitous power Internet of things context: optimization, comparison, and application[J]. IEEE Access, 2019, 7: 150226-150236.
- [43] 张翼, 朱永利. 基于深度-广度联合剪枝的电力设备局部放电轻量化诊断方法 [J]. 电工技术学报, 2023, 38(7): 1935-1945, 1955.
- ZHANG Yi, ZHU Yongli. A lightweight partial discharge diagnosis method of power equipment based on depth-width joint pruning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(7): 1935-1945, 1955.