

文章编号: 1671-251X(2023)01-0046-10

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.18047

# 基于介电响应法的矿用电缆绝缘性能评估方法研究

雷志鹏<sup>1,2,3</sup>, 李蔚<sup>1,2</sup>, 何庆辉<sup>1,2</sup>, 门汝佳<sup>1,2</sup>, 王业<sup>4</sup>, 刘洋<sup>5</sup>, 吝伶俐<sup>1,2</sup>

- (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. 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;
3. 晋能控股山西科学技术研究院有限公司(晋城)技术中心, 山西 晋城 048006;
4. 国网河北省电力有限公司行唐县供电公司, 河北 石家庄 050600;
5. 国网北京市电力公司大兴供电公司, 北京 102600)

**摘要:** 矿用高压电缆在实际使用中易受电、热、机械应力等多种因素的复合作用, 加速绝缘老化, 易导致电缆漏电、短路或放电等故障。目前, 介电响应法被引入矿用电缆绝缘性能及老化状态的分析、评估和诊断中。针对基于介电响应法的电缆绝缘性能及老化状态评估问题, 以常用的三元乙丙橡胶(EPDM)绝缘矿用移动软电缆为研究对象, 总结了介电响应法中回复电压法、极化/去极化电流法和频域介电谱法的基本原理和典型特征量, 对比了3种方法的优缺点。介绍了扩展 Debye 模型提取的老化因子、修正介电弛豫模型提取的弛豫特征量、介质损耗积分谱等基于介电响应模型的电缆绝缘性能评估特征量。从基于回复电压法和极化/去极化电流法的矿用电缆电痕腐蚀程度判别, 以及基于极化/去极化电流法和等温松弛电流、基于介电弛豫模型、基于介质损耗积分值的 EPDM 绝缘多应力老化状态评估等方面, 综述了介电响应法在矿用电缆绝缘性能评估中的应用研究。针对基于介电响应法的矿用电缆绝缘性能评估存在的在线监测技术无法适应煤矿工况、评估用数据不足、绝缘劣化程度与特征量关系未知等问题, 提出应重点研究电缆绝缘状态感知、绝缘劣化程度与特征量关系构建这2项关键技术。

**关键词:** 矿用电缆; 绝缘性能评估; 介电响应法; 回复电压法; 极化/去极化电流法; 频域介电谱法; 多应力老化

中图分类号: TD611

文献标志码: A

Study on evaluation method of insulation performance of mine cable based on dielectric response method

LEI Zhipeng<sup>1,2,3</sup>, LI Wei<sup>1,2</sup>, HE Qinghui<sup>1,2</sup>, MEN Rujia<sup>1,2</sup>, WANG Ye<sup>4</sup>, LIU Yang<sup>5</sup>, LIN Lingyan<sup>1,2</sup>

- (1. National and Provincial Joint Engineering Laboratory of Mining Intelligent Electrical Apparatus Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Shanxi Key Laboratory of Mining Electrical Equipment and Intelligent Control, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 3. Jinneng Holding Shanxi Science and Technology Research Institute Co., Ltd. (Jincheng) Technology Centre, Jincheng 048006, China;
4. Xingtang County Branch of State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050600, China;
5. Daxing Power Supply Company of State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 102600, China)

**Abstract:** The high voltage cable used in mine is affected by many factors, such as electricity, heat and machinery stress. These factors accelerate insulation aging and easily lead to cable leakage, short circuit or discharge. At present, the dielectric response method is introduced into analysis, evaluation and diagnosis of insulation performance and aging state of mine cables. In view of problems of insulation performance and aging

收稿日期: 2022-10-18; 修回日期: 2022-12-30; 责任编辑: 李明。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51977137); 山西省重点研发计划项目(202102040201001); 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, 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.



扫码移动阅读

state evaluation of mine cables, the commonly used ethylene propylene diene monomer (EPDM) insulated mobile flexible cable for mining is taken as the research object. The basic principles and typical characteristics of recovery voltage method, polarization/depolarization current method and frequency-domain dielectric spectroscopy method in dielectric response method are summarized. The advantages and disadvantages of the three methods are compared. The characteristics of cable insulation performance evaluation based on the dielectric response model are introduced. The characteristics include the aging factor extracted by the extended Debye model, relaxation characteristics extracted by the modified dielectric relaxation model and dielectric loss integral spectrum. The application of the dielectric response method in the evaluation of the insulation performance of mine cables is summarized from the following aspects. The aspects include the identification of trace corrosion degree of mine cables based on recovery voltage method and polarization/depolarization current method. The aspects include the evaluation of EPDM insulation multi-stress aging state based on polarization/depolarization current method and isothermal relaxation current, based on dielectric relaxation model and based on dielectric loss integral value. The existing online monitoring technology for the evaluation of the insulation performance of mine cables based on the dielectric response method cannot adapt to the working conditions of coal mines. The evaluation data is insufficient, and the relationship between the insulation deterioration degree and the characteristic quantity is unknown. In order to solve the above problems, this paper puts forward that the research should focus on two key technologies, namely, cable insulation state perception and the relationship between insulation degradation degree and characteristic quantity construction.

**Key words:** mine cable; insulation performance evaluation; dielectric response method; recovery voltage method; polarization/depolarization current method; frequency domain dielectric spectroscopy; multi stress aging

## 0 引言

受益于电牵引综合机械化采煤装备的国产化和智能化,我国已建成数十座千万吨级煤矿,综采工作面总装机功率稳步提升,10 kV 供电已在煤矿井下大范围使用。矿用高压电缆作为煤矿井下唯一的供电线路,其运行可靠性与煤矿安全生产息息相关。然而,煤矿井下环境恶劣,潮湿、粉尘、瓦斯、冒顶、积水等因素给电缆的可靠运行带来了很大的安全隐患<sup>[1-2]</sup>。

与一般工业用电缆不同,矿用高压电缆劣化或故障形成原因有其特殊性,主要体现为电缆在拖拽或移动时遭受多种因素(如电、热、机械应力等)复合作用,加速绝缘老化,形成缺陷。绝缘劣化或缺陷一旦引起漏电、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<sup>[3]</sup>。据统计,在煤矿供电事故中,因电缆故障引发的事故占事故总数的50%以上,而电缆故障原因中有80%为线路绝缘降低到一定程度时导致绝缘击穿,从而引起接地故障。因此,对矿用电缆绝缘性能进行分析与评估,以此掌握电缆绝缘状态,及时修复或更换接近使用寿命期限的电缆,对保障煤矿井下电力系统安全稳定运行具有重要意义。

近年来,介电响应法<sup>[4]</sup>已被引入矿用电缆绝缘性能及老化状态的分析、评估和诊断中。本文以煤矿井下广泛应用的三元乙丙橡胶(Ethylene Propylene

Diene Monomer, EPDM)绝缘移动软电缆为研究对象,介绍了介电响应法中回复电压法(Return Voltage Method, RVM)、极化/去极化电流(Polarization and Depolarization Current, PDC)法、频域介电谱(Frequency-domain Dielectric Spectroscopy, FDS)法的基本原理和基于介电响应法得到的特征量,综述了介电响应法在矿用电缆绝缘性能评估中的典型应用,并对矿用电缆绝缘性能评估关键技术进行了分析和展望。

## 1 介电响应法

介电响应法可获取电缆绝缘的极化过程、电导率、空间电荷等,并能有效表征绝缘的整体性能变化规律<sup>[5]</sup>,特别适合于对电缆绝缘整体性能进行分析与评估。

介电响应法包括时域和频域两大类,均可实现无损检测。其中时域介电响应法主要包括RVM和PDC法;频域介电响应法主要是FDS法。

### 1.1 RVM

在绝缘两端施加直流高压时,绝缘会发生极化现象。撤去外施电压并短接绝缘两端,束缚电荷立即释放,绝缘内部发生去极化过程。放电一段时间后,断开绝缘两端的短接线,残余的束缚电荷在绝缘两端建立一个电势差,称为回复电压。

RVM原理如图1所示。闭合开关 $S_1$ 对电缆试样进行充电,充电时间为 $t_c$ ;断开 $S_1$ ,闭合 $S_2$ ,使试样

处于去极化状态,记录放电时间  $t_d$ ; 放电一定时间后,断开  $S_2$ , 测量试样上的电压, 即可获得回复电压曲线。根据回复电压曲线可得回复电压初始斜率  $k$ 、回复电压最大值  $U_{\max}$ 、达到  $U_{\max}$  时对应的中心时间常数  $t_z$  等与电缆绝缘状态密切相关的特征量<sup>[6]</sup>。

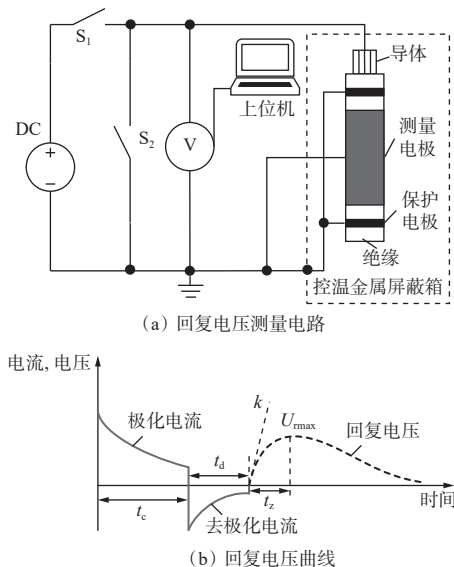


图 1 RVM 原理

Fig. 1 Return voltage method(RVM) principle

## 1.2 PDC 法

PDC 法与等温松弛电流(即恒定温度下的去极化电流)密切相关<sup>[7]</sup>。PDC 法原理如图 2 所示。测量极化电流时,闭合开关  $S_1$  和  $S_3$ , 断开  $S_2$ , 对电缆施加直流电压;约 5 s 后(避免过大的充电电流),保持  $S_1$  闭合,断开  $S_3$ , 开始测量极化电流;极化电流测量完毕后闭合  $S_3$ , 切断直流电源,断开  $S_1$ ;保持约 5 s 后,闭合  $S_2$ , 断开  $S_3$ , 测量去极化电流。

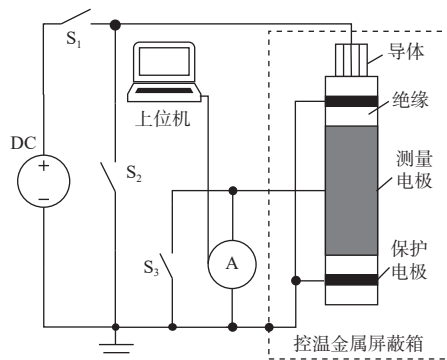


图 2 PDC 法原理

Fig. 2 Polarization and depolarization current(PDC) method principle

通过测量极化电流和去极化电流可提取多种表征绝缘宏观性能和老化程度的特征量,如极化电流稳态值和初始变化率,去极化电流初值、稳态值和变化率,极化/去极化电荷总量,15, 60, 600 s 绝缘电阻、直流电导率、非线性系数等<sup>[6]</sup>。

## 1.3 FDS 法

FDS 法是在电缆试样两端施加一个交流电压,获得电流和电位差,然后计算复介电常数、复电容、低频介质损耗角正切值、复介电模量等介电参数<sup>[3]</sup>,如图 3 所示。

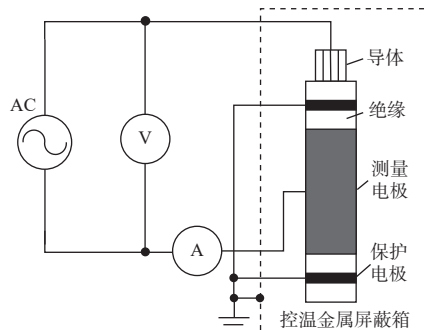


图 3 FDS 法原理

Fig. 3 Frequency-domain dielectric spectroscopy(FDS) method principle

## 1.4 不同介电响应法比较

3 种介电响应法的优缺点见表 1。RVM、PDC 法、FDS 法均可通过控制测量时施加的电压幅值实现无损测量。RVM 易受绝缘中积聚的电荷影响,且测量时间较长。PDC 法易受电流采样率的影响,可能导致初始电流测量数据不足,使高频信息损失严重,且现场应用时易受外部干扰,导致电流波动较大。FDS 法在测量频率小于 1 Hz 时,频率越低,则测量时间越长,且频率太低或太高时均易受外部干扰影响,导致测量误差增大,只适用于 1 Hz~1 MHz 频率范围的测量。

表 1 介电响应法优缺点

Table 1 Advantages and disadvantages of dielectric response methods

| 方法    | 优点                 | 缺点                       |
|-------|--------------------|--------------------------|
| RVM   | 无损检测,易于现场测量,抗干扰能力强 | 易受电荷积聚影响,测量时间较长          |
| PDC 法 | 无损检测,能分辨出电导极化现象    | 易受现场干扰,高频信息损失严重,初始电流难以测量 |
| FDS 法 | 无损检测,不受电荷积聚影响,信息丰富 | 低频测量时间长,测量电压低            |

## 2 基于介电响应模型的电缆绝缘特征量

除上述由介电响应法直接提取的基本特征量可用于评估矿用电缆绝缘状态外,基于介电响应模型提取的特征量也逐渐成为目前的研究热点,主要包括由扩展 Debye 模型提取的老化因子、修正介电弛豫模型提取的弛豫特征量、介质损耗积分谱等。

### 2.1 老化因子

电缆绝缘介质可用  $n$ (一般取 3)个电阻和电容支

路扩展 Debye 模型进行等效, 如图 4 所示。 $C_0$  为几何电容;  $R_0$  为绝缘电阻;  $R_1, C_1$  为表征绝缘电介质体极化的支路参数;  $R_2, C_2$  为表征非晶体与晶体界面极化的支路参数;  $R_3, C_3$  为表征绝缘劣化后缺陷处界面极化的支路参数。

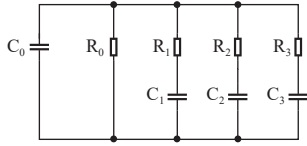


图 4 扩展 Debye 模型

Fig. 4 Extend Debye model

基于扩展 Debye 模型, 极化电流  $i_p$  和去极化电流  $i_{dp}$  可表示为

$$i_p = I_0 + \sum_{j=1}^3 \alpha_j \exp\left(-\frac{t}{\tau_j}\right) \quad (1)$$

$$i_{dp} = \sum_{j=1}^3 \alpha_j \exp\left(-\frac{t}{\tau_j}\right) \quad (2)$$

式中:  $I_0$  为没有绝缘时的充电电流;  $\alpha_j$  为常数;  $t$  为时间;  $\tau_j$  为时间常数。

根据式(1)和式(2), 结合基于等温松弛理论对电缆绝缘内部电荷量变化及陷阱能级的分析, 可进一步得出表征电缆绝缘老化程度的老化因子  $A$ :

$$A = \frac{Q_{\tau_3}}{Q_{\tau_2}} \quad (3)$$

$$Q_{\tau_3} = 1 + \frac{\alpha_2 \tau_2}{\alpha_1 \tau_1} \left(1 - \exp\left(-\frac{\tau_3}{\tau_2}\right)\right) + \frac{\alpha_3 \tau_3}{\alpha_1 \tau_1} (1 - \exp(-1)) \quad (4)$$

$$Q_{\tau_2} = 1 + \frac{\alpha_3 \tau_3}{\alpha_1 \tau_1} \left(1 - \exp\left(-\frac{\tau_2}{\tau_3}\right)\right) + \frac{\alpha_2 \tau_2}{\alpha_1 \tau_1} (1 - \exp(-1)) \quad (5)$$

式中:  $Q_{\tau_2}$  为由电缆绝缘内晶体与非晶体的界面极化决定的量;  $Q_{\tau_3}$  为由绝缘体因老化引起的各种极化决定的量。

根据式(3)得到的老化因子已应用于 35 kV 及以下中低压配电电缆绝缘性能评估中。将老化因子与电缆残余击穿电压比较, 可得基于老化因子的电缆绝缘性能评估标准<sup>[8-9]</sup>。用于 35 kV 及以下中低压交联聚乙烯电缆绝缘状态评估的典型老化因子见表 2<sup>[10]</sup>。老化因子越大, 表明绝缘劣化越严重。因此, 只要测量得到电缆绝缘的老化因子, 即可在现场判断绝缘状态。

## 2.2 弛豫特征量

大多数绝缘不可能仅具有单一的弛豫时间, 为了更加准确地描述电缆绝缘的弛豫过程, 对 Debye 模型进行修正, 得到 Havriliak-Negami 模型:

表 2 交联聚乙烯电缆绝缘状态评估用典型老化因子

Table 2 Typical aging factors for estimating insulation performance of XLPE cable

| 电缆绝缘状态 | 老化因子      |
|--------|-----------|
| 非常好    | 0~1.75    |
| 中年     | 1.75~1.90 |
| 老化严重   | 1.90~2.10 |
| 劣化     | >2.10     |

$$\varepsilon_{HN}^*(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\Delta\varepsilon}{[1 + (i\omega\tau)^{\beta}]^{\gamma}} \quad (6)$$

式中:  $\varepsilon_{HN}^*$  为复介电常数;  $\omega$  为角频率;  $\varepsilon_{\infty}$  为光频介电常数;  $\Delta\varepsilon$  为弛豫强度,  $\Delta\varepsilon = \varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}$ ,  $\varepsilon_s$  为静态介电常数;  $\tau$  为时间常数;  $\beta, \gamma$  为形状参数,  $\beta > 0, \gamma \leq 1$ 。

当  $\beta, \gamma$  均为 1 时, 式(6)为 Debye 模型, 其在复平面上为一个标准的半圆; 当  $\gamma$  为 1 时, 式(6)为 Cole-Cole 模型, 其具有多弛豫时间分布, 在复平面上为一段劣弧; 当  $\beta$  为 1 时, 式(6)为 Cole-Davidson 模型, 介电弛豫偏移导致其为一段不对称的曲线。

若考虑因电极极化和 Maxwell-Wagner 界面极化引起的离子载流子影响, 式(6)可修订为

$$\varepsilon^*(\omega) = -ia \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 \omega^s} + \varepsilon_{HN}^*(\omega) \quad (7)$$

式中:  $a$  为维度因子;  $\sigma_0$  为绝缘的直流电导率;  $\varepsilon_0$  为真空介电常数;  $s$  为幂指数,  $0 < s \leq 1$ 。

利用式(7)对介电谱数据进行拟合, 可得到直流电导率、弛豫强度、弛豫时间常数等反映绝缘导电、极化和损耗性能的特征量, 从而实现电缆绝缘性能评估。

## 2.3 介质损耗积分谱

基于 FDS 法测量数据, 将介质损耗和频率都考虑在内, 对介质损耗因数频谱图进行积分处理, 得到与绝缘老化程度具有较好相关性的介质损耗积分值。介质损耗积分值的具体计算方法是选择一个频率点为基准点, 分别对测量的频率点与基准点之间的介质损耗进行积分, 即计算不同频率段的面积, 从而得到介质损耗积分值随频率的变化, 称为频域介质损耗积分谱。

频域介质损耗积分谱可反映某一频率范围内的的介质损耗累计值, 包含介质损耗和频率, 携带更多的绝缘老化状态信息, 且曲线具有饱和特性, 可作为反映绝缘老化状态的特征量。

## 3 基于介电响应法的矿用电缆绝缘性能评估

### 3.1 基于 RVM 和 PDC 法的电痕腐蚀程度判别

电痕腐蚀是常发生在矿用高压电缆接头和接线

盒处的绝缘劣化现象,严重时可导致接头或接线盒爆炸<sup>[11]</sup>,如图 5 所示。



图 5 因电痕腐蚀引发故障的矿用电缆接头

Fig. 5 Mine-used cable's joint with failure caused by electrical tracking corrosion

针对矿用 10 kV EPDM 绝缘电缆接头电痕腐蚀问题,文献[12]模拟电缆运行环境,研究了不同电痕腐蚀程度的 EPDM 绝缘特性,基于 RVM 和 PDC 法提取了绝缘电阻等表征表面电痕腐蚀程度的特征量。矿用 10 kV 电缆绝缘用 EPDM 在不同电痕腐蚀程度下的去极化电流如图 6 所示,其中 EPMD0 无电痕腐蚀,EPMD1 最大电痕长度、宽度分别为 32.4, 3.9 mm, EPMD2 最大电痕长度、宽度分别为 39.2, 6.8 mm, EPMD3 最大电痕长度、宽度分别为 46.2, 7.3 mm。可看出随着电痕腐蚀程度增加,EPDM 的去极化电流逐渐增大<sup>[13]</sup>。

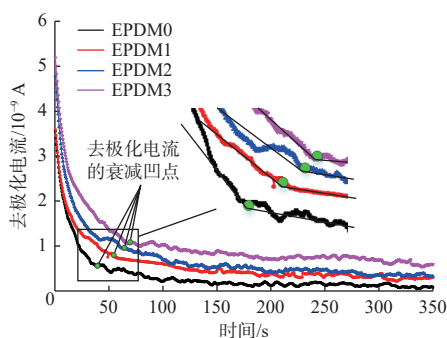


图 6 不同电痕腐蚀程度的电缆绝缘用 EPDM 去极化电流

Fig. 6 Depolarization current of ethylene propylene diene monomer (EPDM) for cable insulation with different corrosion degree of electrical tracking

根据去极化电流可得绝缘电阻:

$$R' = \frac{U_0}{i_p - i_{dp}} \quad (8)$$

式中  $U_0$  为施加的直流电压幅值。

根据式(8)计算得到的绝缘电阻见表 3, 其中  $R$  为使用绝缘电阻表测量的相同直流电压下的绝缘电阻。可看出  $R'$  与  $R$  变化趋势一致,即随着电痕腐蚀程度增加,绝缘电阻呈逐渐减小趋势。此外,可进一步得到直流电导率、非线性系数等特征量,并结合 RVM 提取的特征量实现对电缆绝缘电痕腐蚀程度

的表征。

表 3 电缆绝缘电阻

Table 3 Insulation resistances of cable

| 试样    | $R/\text{G}\Omega$ | $R'/\text{G}\Omega$ | 误差/% |
|-------|--------------------|---------------------|------|
| EPDM0 | 360.9              | 335                 | 7.16 |
| EPDM1 | 234.3              | 222                 | 5.26 |
| EPDM2 | 142.0              | 138                 | 2.82 |
| EPDM3 | 125.5              | 127                 | 1.17 |

不同电痕腐蚀程度的电缆绝缘用 EPDM 典型回复电压曲线如图 7 所示。可看出随着电痕腐蚀程度增加,回复电压曲线抬高,回复电压最大值  $U_{\text{max}}$  增大,相应的中心时间常数  $t_z$  逐渐减小。主要原因是电痕腐蚀导致 EPDM 绝缘表面出现分层现象,其介质响应过程与双层电介质绝缘类似<sup>[14-15]</sup>,腐蚀程度越严重,则 2 种介质之间的接触越多,使得界面上发生极化的概率和强度呈增大趋势,加快介电弛豫速度。也就是说,  $t_z$  越小,极化强度越大,在电痕腐蚀区域积聚的电荷数量越多。电痕腐蚀区域出现的双层结构不利于电荷消散,使得在相同去极化时间内回复电压升高。因此,回复电压最大值  $U_{\text{max}}$  和相应的中心时间常数  $t_z$  均可作为表征电痕腐蚀程度的特征量,即  $U_{\text{max}}$  越大,相应的  $t_z$  越小,则 EPDM 绝缘表面电痕腐蚀程度越严重。

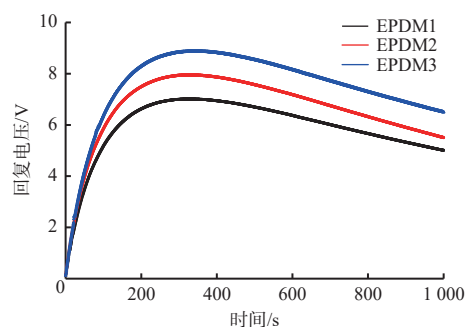


图 7 不同电痕腐蚀程度的电缆绝缘用 EPDM 回复电压

Fig. 7 Return voltage of EPDM for cable insulation with different corrosion degree of electrical tracking

### 3.2 多应力老化状态评估

除电缆接头和接线盒处易出现的绝缘电痕腐蚀外,矿用电缆本体在实际运行工况中常遭受电、热、机械应力、潮湿等多种因素共同作用,导致 EPDM 绝缘老化速度加快。因此,研究多因素作用下矿用电缆绝缘老化状态评估方法,对于掌握电缆绝缘状态、保障供电可靠性尤为重要。本文以电、热、挤压力 3 种因素为例,综述矿用电缆 EPDM 绝缘老化状态评估方法。

#### 3.2.1 基于 PDC 法和等温松弛电流的老化状态评估

经电、热、挤压力多因素作用老化的 EPDM 极

化电流和去极化电流如图 8 所示(极化电流测量电压为 300 V, 去极化电流取绝对值)。可看出极化电流稳定值随老化时间增加而增大, 老化 60 h 的极化电流稳定值约为 4.56 pA, 约为未老化试样极化电流稳定值(2.31 pA)的 2 倍。多因素作用老化引起的 EPDM 极化电流和去极化电流变化与氧化、降解、交联反应引起的 EPDM 微观结构变化密切相关。热氧老化过程包括链引发、链增长、链终止 3 个阶段。在链引发阶段, 热应力使得 EPDM 分子形成大分子自由基 R 与氢过氧化物 ROOH; 在链增长阶段, 当 ROOH 积累到一定程度时, 会分解产生大量自由基, 起到自动催化效应, 氧化物和载流子的增加使得去极化电流越来越大; 在链终止阶段, 各种含氧自由基彼此碰撞, 形成酯醛酮类等复杂结构。在热交联反应方面, EPDM 分子会生成横键, 形成三度结构, 或在 1 个分子内产生环状结构。上述反应会影响 EPDM 内部载流子浓度、陷阱能级等, 使得极化电流和去极化电流发生变化。

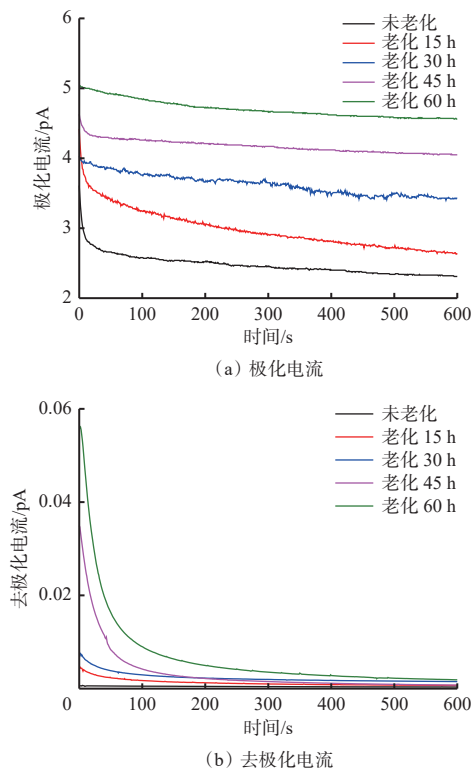


图 8 多因素作用老化的 EPDM 极化电流和去极化电流  
Fig. 8 Polarization and depolarization currents of EPDM aged under multi factors

进一步结合等温松弛理论, 基于去极化电流可得多因素作用老化后不同老化阶段的 EPDM 老化因子, 见表 4。正常情况下, 未老化 EPDM 的老化因子约为 2, 表明绝缘性能良好。当应力作用时间或老化时间较短时, 老化因子变化不大。老化 15 h 后, 老化因子增幅约为 9%, EPDM 处于受损初期。随着老化

时间增加, 老化因子增速逐渐增大。老化 45 h 后, 老化因子接近 3, 增幅约为 45%, 表明绝缘已出现损坏, 但绝缘性能并未完全丧失。老化 60 h 后, 老化因子超过 6, 增幅超过 200%, 表明 EPDM 劣化严重, 随时可能丧失绝缘性能, 引起绝缘击穿。从前 45 h 的老化情况可看出, 多因素作用下 EPDM 老化过程并非为线性, 而是呈现指数变化。老化因子与老化时间满足下式:

$$A = 2.18 + 0.00788 \exp(0.104t') \quad (9)$$

式中  $t'$  为老化时间。

表 4 不同老化时间下 EPDM 老化因子

| Table 4 Ageing factors of EPDM under different ageing time |      |      |      |      |      |
|------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|
| 老化时间/h                                                     | 0    | 15   | 30   | 45   | 60   |
| 老化因子                                                       | 2.02 | 2.20 | 2.63 | 2.92 | 6.24 |

对比表 2 和表 4 可看出, 矿用电缆绝缘用 EPDM 的老化因子明显大于交联聚乙烯电缆绝缘, 且变化范围较大。因此, 在实际使用矿用电缆时, 可先测定新电缆的老化因子作为参考值。在电缆使用过程中定期测量老化因子, 若老化因子出现明显增大情况, 则应密切关注, 特别是老化因子增大 40% 后, 如有条件应更换电缆进行检修, 或缩短老化因子测量周期; 若老化因子增幅超过 200%, 则应立即更换电缆, 避免绝缘故障, 造成供电事故。使用老化因子评估矿用电缆绝缘用 EPDM 老化状态时, 不仅要关注实际数值, 还要综合分析老化因子增幅, 避免因老化因子初始值过大而造成误判。

### 3.2.2 基于介电弛豫模型的老化状态评估

文献 [16] 采用 PDC 法和 FDS 法对不同老化状态的 EPDM 绝缘性能进行了分析。在 FDS 法基础上, 采用 Havriliak-Negami 模型参数解释了 EPDM 的介电弛豫过程 [17], 采用牛顿法与通用全局优化方法相结合的数值拟合方法得到特征量, 见表 5。可看出随着老化时间增加, 电极化强度  $\chi_s$ 、直流电导率  $\sigma_0$  和跳跃电导率  $\sigma_H$  均增大。

表 5 EPDM 的 Havriliak-Negami 模型特征量

| Table 5 Characteristic parameters of Havriliak-Negami model of EPDM |          |          |                                                     |                                                     |
|---------------------------------------------------------------------|----------|----------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 老化时间/h                                                              | $\chi_s$ | $\tau/s$ | $\sigma_0/(10^{-15} \text{ S} \cdot \text{m}^{-1})$ | $\sigma_H/(10^{-12} \text{ S} \cdot \text{m}^{-1})$ |
| 0                                                                   | 0.02     | 0.930    | 1.29                                                | 0.85                                                |
| 200                                                                 | 0.28     | 0.005    | 4.93                                                | 2.81                                                |
| 400                                                                 | 0.52     | 0.070    | 4.96                                                | 4.99                                                |
| 600                                                                 | 1.10     | 1.030    | 13.5                                                | 17.8                                                |

文献 [18] 在 Cole-Cole 模型基础上, 采用双弛豫 Cole-Cole 模型, 综合考虑界面极化、偶极子转向极

化和直流电导率,对电、热和挤压力多因素作用下老化的 EPDM FDS 曲线进行分析,得到弛豫强度、弛豫时间常数、直流电导率等特征量,如图 9 所示。

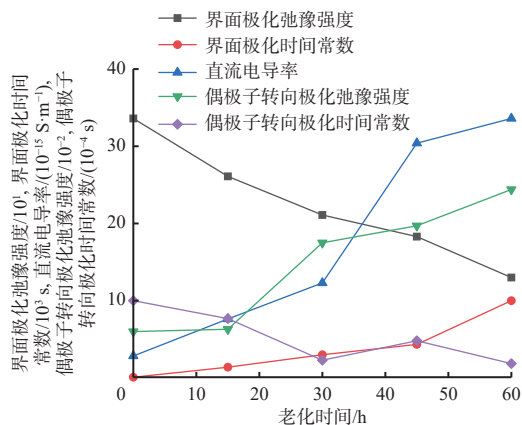


图 9 EPDM 的双弛豫 Cole-Cole 模型特征量

Fig. 9 Characteristic parameters of double relaxation Cole-Cole model of EPDM

从图 9 可看出,随着老化时间增加,界面极化弛豫强度逐渐减小,界面极化时间常数、偶极子转向极化弛豫强度、直流电导率逐渐增大,偶极子转向极化时间常数整体呈下降趋势。特别是界面极化弛豫强度和界面极化时间常数可较好地反映绝缘老化趋势。从特征量变化规律分析,双弛豫 Cole-Cole 模型较 Havriliak-Negami 模型更适用于对 EPDM 在多因素作用老化后的 FDS 进行分析。

界面极化弛豫强度  $\Delta\epsilon_d$  和界面极化时间常数  $\tau_d$  与老化时间  $t$  满足下式:

$$\begin{cases} \Delta\epsilon_d = 3.22 - 0.032 \cdot 7t' \\ \tau_d = 673.89 \exp(0.045t') - 192.49 \end{cases} \quad (10)$$

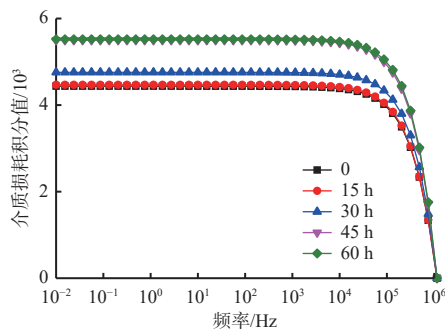
将式(9)代入式(10),即可得出老化因子与弛豫强度或弛豫时间常数的关系,为分析老化因子发生变化的原因提供依据。

### 3.2.3 基于介质损耗积分值的老化状态评估

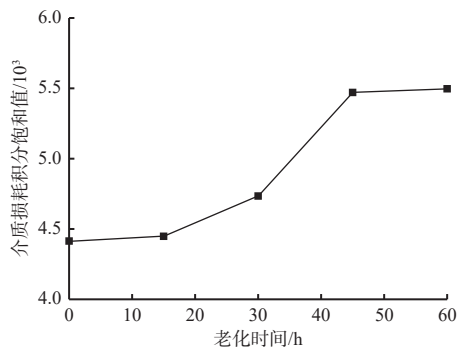
经电、热和挤压力多因素作用老化的 EPDM 介质损耗积分值如图 10 所示。可看出介质损耗积分值存在明显的饱和特性,在频率小于约 10 kHz 时出现饱和,即介质损耗积分值不随频率减小而变化。分析不同老化程度的 EPDM 介质损耗积分值得出,随着老化时间增加,介质损耗积分值曲线形状不发生变化,但整体向上偏移。介质损耗积分饱和值随老化时间增加而增大,且在老化中段变化最明显。介质损耗积分饱和值为

$$D = 4381.04 - 1389.58 \exp(0.117t') + 1809.33 \exp(0.117t') \quad (11)$$

因此,可利用介质损耗积分饱和值作为老化因子的补充,弥补当老化因子变化不大时,因现场测量



(a) 介质损耗积分值



(b) 介质损耗积分饱和值

图 10 不同老化时间下 EPDM 介质损耗积分值

Fig. 10 Dielectric loss integral value of EPDM under different aging time

误差导致的老化因子分析误差。

## 4 矿用电缆绝缘性能评估关键技术

随着在线监测、故障诊断、寿命评估等技术逐渐应用于矿用电气设备运维,矿用高压电缆绝缘状态分析方法正从定期巡检向状态维修和预测性维护转变。基于介电响应法的电缆绝缘性能评估方法虽能为矿用电缆状态维修和预测性维护提供依据,但也面临在线监测技术无法适应煤矿工况、评估用数据不足、绝缘劣化程度与特征量关系未知等问题,特别是针对矿用电缆的绝缘性能评估技术缺少状态感知技术的支撑,严重影响了煤矿电气设备智能化发展。因此,应重点解决电缆绝缘状态感知、绝缘劣化程度与特征量关系构建这 2 项关键技术。

### 4.1 绝缘状态感知技术

目前适用于矿用高压电缆的绝缘状态感知技术包括在线监测和离线检测两类。在线监测技术以局部放电<sup>[19-20]</sup>、泄漏电流<sup>[21-22]</sup>、局部温度<sup>[23]</sup>监测为主,其中以局部放电监测最为普及,但该方法易受来自变压器和电动机的局部放电及现场干扰影响,导致电缆局部放电被淹没,无法有效诊断绝缘故障<sup>[24-26]</sup>。为实现矿用高压电缆局部放电在线监测,需根据其运行工况,选择软硬件相结合的抗干扰措施,分离各种干扰,提取电缆缺陷或故障放电频带的局部放电

信号和放电谱图。

泄漏电流监测主要是测量反映绝缘电阻的直流电导电流。该方法需要在电缆导体上附加1个较低的直流电压,测量经绝缘流入接地线的直流电流。受《煤矿安全规程》等制约,施加的直流电压较低(如48 V),导致可测量的电流幅值低,测量误差较大,未得到推广应用<sup>[27-29]</sup>。一种可行的方法是直接测量流过电缆绝缘的交流电流,结合电压和相位差,采用介电响应法计算直流电导率等参数,实现绝缘状态评估。该方法目前以离线检测为主,在线测量技术还需进一步研究。

局部温度监测可实现对矿用高压电缆接头和接线盒处绝缘温度的在线监测<sup>[30]</sup>,但无法测量电缆本体绝缘的温度分布<sup>[31]</sup>。目前已有分布式光纤测温方法用于非矿用电缆,但该方法受光纤无法频繁弯曲的影响,不适用于矿用移动类高压软电缆温度测量,如采煤机拖拽电缆。未来红外热像仪和分布式低功耗传感器可用于矿用移动类高压软电缆本体温度监测,如:采用网络化红外热像仪,将其安装在采煤机机身,定时拍摄电缆的红外热像图,结合环境温度和运行电流,计算或仿真出绝缘内层和外层的温度,同时实现异常温升点监测;采用分布式低功耗传感器技术开发的微型无线温度传感器可沿电缆分布式安装,实现对电缆本体温度的分布式测量。但上述方法均为间接测量绝缘温度,如何在不同工况下准确快速地测量或计算出绝缘温度还需深入研究。

#### 4.2 绝缘劣化程度与特征量关系构建

矿用高压电缆特别是运行于综采工作面和掘进工作面的移动类软电缆,不仅运行环境湿度大,而且易受电、热、机械应力等多种因素的共同作用。如采煤机拖拽电缆正常运行电流约为400 A,启动电流可达2 000 A。这使得电缆绝缘既要承受缺陷放电、自身介质损耗大产生的热量,还要承受电动机频繁重载启停引起的温升。此外,采煤机拖拽电缆跟随采煤机沿工作面在狭窄空间内来回连续移动,使得绝缘要承受拉拽、弯曲、挤压等机械应力作用。多因素共同作用导致电缆绝缘劣化速度加快,电缆寿命缩短。为实现矿用高压电缆绝缘性能评估,需明确绝缘劣化程度与特征量的关系。这就需要模拟电缆运行工况条件,对绝缘进行多因素老化,测量处于不同老化阶段的绝缘性能,提取用于表征绝缘性能的特征量。

早期研究人员更多地关注电和热因素共同作用下的绝缘劣化问题<sup>[32-33]</sup>。近年来,较多的学者开始研究机械应力与电、热因素共同作用下的绝缘性能

变化规律,针对矿用电缆开展了挤压力或拉伸力与电、热因素共同作用下EPDM绝缘性能评估方法的研究<sup>[34-35]</sup>,对于理解EPDM劣化程度与典型绝缘特征量的关系起到了积极作用。但仍有部分特征量与绝缘劣化程度缺乏明显的函数关系,且存在不同机械应力下特征量变化规律不一致问题。基于多源数据的人工智能算法或数字孪生技术为解决该问题提供了新的思路<sup>[36-37]</sup>。人工智能算法可从数据的内在规律分析,挖掘出对矿用高压电缆绝缘性能评估和寿命预测等有价值的信息。数字孪生技术则可通过实验建立模拟电缆绝缘处于不同状态时的数学表达式或模型,将在线监测、离线检测等运维数据代入多物理场仿真模型中,通过仿真鉴别数据质量,反演出电缆绝缘性能变化趋势,从而实现绝缘性能评估。

## 5 结论

(1) 介电响应法作为一种无损测量方法,可实现对矿用EPDM电缆绝缘性能的评估,但不同特征量与绝缘劣化程度的相关性存在区别。老化因子、极化强度、介质损耗积分饱和值等与绝缘劣化程度具有较好的相关性,可用于评估矿用电缆绝缘状态。

(2) 为实现矿用高压电缆绝缘性能评估,未来应重点研究绝缘状态感知、绝缘劣化程度与特征量关系构建等关键技术。

#### 参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 王思宇, 刘洋, 雷志鹏, 等. 基于极化电流的挤压力和热应力作用下电缆用乙丙橡胶绝缘性能的研究[J]. *绝缘材料*, 2022, 55(4): 56-61.  
WANG Siyu, LIU Yang, LEI Zhipeng, et al. Research on insulation performance of EPDM for cables under extrusion pressure and thermal stress based on polarization current[J]. *Insulating Materials*, 2022, 55(4): 56-61.
- [3] 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.
- [4] JONSCHER A K. The 'universal' dielectric response. I[J]. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 1990, 6(2): 16-22.
- [5] LEI Zhipeng, SONG Jiancheng, GENG Pulong, et al. Influence of temperature on dielectric properties of EPR

- and partial discharge behavior of spherical cavity in EPR insulation[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2015, 22(6): 3488-3497.
- [6] 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.
- [7] SIMMONS J G, TAM M C. Theory of isothermal currents and the direct determination of trap parameters in semiconductors and insulators containing arbitrary trap distributions[J]. *Physical Review B*, 1973, 7(8): 3706-3713.
- [8] 高树国, 朱永华, 吴长顺, 等. 等温松弛法在三元乙丙橡胶绝缘电缆连接器的老化评估中的应用研究[J]. *电工电能新技术*, 2015, 34(5): 76-80.
- GAO Shuguo, ZHU Yonghua, WU Changshun, et al. Application of isothermal relaxation to aging assessment of EPDM rubber insulated cable connectors[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2015, 34(5): 76-80.
- [9] 朱永华, 高小庆, 杨娟娟, 等. 等温松弛电流法在高压交联聚乙烯绝缘交流电缆状态评估中的应用[J]. *高压电压技术*, 2016, 42(2): 513-521.
- ZHU Yonghua, GAO Xiaoqing, YANG Juanjuan, et al. Application of isothermal relaxation current technique in condition assessment for XLPE HVAC cables[J]. *High Voltage Engineering*, 2016, 42(2): 513-521.
- [10] SHAYEGANI A A, GOCKENBACH E, BORSI H, et al. Investigation on the transformation of time domain spectroscopy data to frequency domain data for impregnated pressboard to reduce measurement time[J]. *Electrical Engineering*, 2006, 89: 11-20.
- [11] 雷志鹏, 冯晨, 宋建成, 等. 乙丙橡胶绝缘的表面击穿与沿面放电特性[J]. *高压电压技术*, 2016, 42(12): 3924-3933.
- LEI Zhipeng, FENG Chen, SONG Jiancheng, et al. Surface breakdown and surface discharge characteristics of ethylene propylene rubber insulation[J]. *High Voltage Engineering*, 2016, 42(12): 3924-3933.
- [12] 冯晨, 雷志鹏, 任鸿秋, 等. 乙丙橡胶表面电痕腐蚀对极化-去极化电流的影响[J]. *高压电压技术*, 2017, 43(10): 136-141.
- FENG Chen, LEI Zhipeng, REN Hongqiu, et al. Effect of surface electrical tracking of ethylene propylene rubber on polarization-depolarization current[J]. *High Voltage Apparatus*, 2017, 53(10): 136-141.
- [13] 王少飞, 雷志鹏, 宋建成, 等. 乙丙橡胶表面电痕腐蚀对极化/去极化电流的影响[J]. *高压电压技术*, 2019, 45(6): 99-104.
- WANG Shaofei, LEI Zhipeng, SONG Jiancheng, et al. Influence of electrical trace on polarization/depolarization current of ethylene-propylene rubber[J]. *High Voltage Apparatus*, 2019, 55(6): 99-104.
- [14] MEN Rujia, LEI Zhipeng, SONG Jiancheng, et al. Effect of thermal aging on space charge in ethylene propylene rubber at DC voltage[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2019, 26(3): 792-800.
- [15] 徐航, 杜伯学, 苏金刚. 拉伸状态下聚丙烯/聚烯烃弹性体共混物的空间电荷和陷阱分布特性[J]. *高压电压技术*, 2017, 43(2): 453-459.
- XU Hang, DU Boxue, SU Jingang. Space charge behaviors and trap distributions of polypropylene/polyolefin elastomer blend under different elongation ratios[J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(2): 453-459.
- [16] 林晨, 吝伶俐, 雷志鹏, 等. 基于PDC的多应力老化乙丙橡胶电缆绝缘状态评估[J]. *绝缘材料*, 2020, 53(1): 70-75.
- LIN Chen, LIN Lingyan, LEI Zhipeng, et al. State evaluation of multi-stress aged EPR cable insulation based on PDC[J]. *Insulating Materials*, 2020, 53(1): 70-75.
- [17] KREMER F, SCHÖNHALS A. Broadband dielectric spectroscopy[M]. Springer, 2003.
- [18] 王业, 李蔚, 雷志鹏, 等. 挤压应力和热应力下电缆绝缘用三元乙丙橡胶的介电频谱分析[J]. *绝缘材料*, 2021, 54(12): 94-100.
- WANG Ye, LI Wei, LEI Zhipeng, et al. Dielectric spectroscopy analysis of ethylene propylene diene monomer for cable insulation under force and thermal stress[J]. *Insulating Materials*, 2021, 54(12): 94-100.
- [19] 曾君湘, 宋建成, 雷志鹏, 等. 针-板电极下交联聚乙烯电缆绝缘中电树枝生长规律的研究[J]. *高压电压技术*, 2019, 45(2): 156-163.
- ZENG Junxiang, SONG Jiancheng, LEI Zhipeng, et al. Research on the growth dynamics of electrical trees in the insulation of XLPE cables under the needle-plane electrode[J]. *High Voltage Apparatus*, 2019, 55(2): 156-163.
- [20] 周冰. 煤矿高压电缆局部放电脉冲信号去噪研究[J]. *工矿自动化*, 2017, 43(12): 22-26.
- ZHOU Bing. Research on partial discharge pulse signal denoising of high voltage cable in coal mine[J]. *Industry and Mine Automation*, 2017, 43(12): 22-26.
- [21] 张敏, 武兴华, 耿蒲龙, 等. 矿井供电电缆绝缘电阻不对称对交流杂散电流分布的影响[J]. *工矿自动化*, 2019, 45(2): 65-69.
- ZHANG Min, WU Xinghua, GENG Pulong, et al. Influence of insulation resistance asymmetry of mine power cable on AC stray current distribution[J]. *Industry and Mine Automation*, 2019, 45(2): 65-69.

- [22] 王永升, 李晓娜, 赵国栋, 等. 煤矿高压电缆绝缘在线监测研究[J]. *工矿自动化*, 2016, 42(6): 65-69.  
WANG Yongsheng, LI Xiaona, ZHAO Guodong, et al. Research of online monitoring of high voltage cable insulation degradation of coal mine[J]. *Industry and Mine Automation*, 2016, 42(6): 65-69.
- [23] 孙晓斐. 矿用高压电缆绝缘特性在线评估系统的开发[D]. 太原: 太原理工大学, 2013.  
SUN Xiaofei. Development of on-line assessment system of insulation characteristics for high voltage cables in coal mine[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2013.
- [24] 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.
- [25] 李玮, 吝伶俐, 康爱亮, 等. 温度和湿度对高压电动机定子绕组相间放电的影响[J]. *绝缘材料*, 2019, 52(9): 58-64.  
LI Wei, LIN Lingyan, KANG Ailiang, et al. Effects of temperature and humidity on phase-to-phase discharge of stator winding for high-voltage motor[J]. *Insulating Materials*, 2019, 52(9): 58-64.
- [26] 万志强, 曹鹏刚, 宋建成, 等. 矿用隔爆型干式变压器绕组局部放电对温升的影响[J]. *工矿自动化*, 2018, 44(5): 36-41.  
WAN Zhiqiang, CAO Penggang, SONG Jiancheng, et al. Influence of partial discharge on temperature rise of windings of mine-used flameproof dry-type transformer[J]. *Industry and Mine Automation*, 2018, 44(5): 36-41.
- [27] 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.
- [28] 曹俊平, 蒋愉宽, 王少华, 等. XLPE电力电缆接头缺陷检测关键技术分析与展望[J]. *高压电器*, 2018, 54(7): 87-97.  
CAO Junping, JIANG Yukuan, WANG Shaohua, et al. Analysis and prospect of defect detection key technology for XLPE power cable joints[J]. *High Voltage Apparatus*, 2018, 54(7): 87-97.
- [29] 赵瑞雪, 门汝佳, 徐晓晓, 等. 纳米SiO<sub>2</sub>添加对乙丙橡胶相对介电常数和电导特性的影响[J]. *绝缘材料*, 2021, 54(1): 18-24.  
ZHAO Ruixue, MEN Rujia, XU Xiaoxiao, et al. Effect of nano-SiO<sub>2</sub> addition on relative permittivity and conduction characteristic of ethylene propylene diene monomer[J]. *Insulating Materials*, 2021, 54(1): 18-24.
- [30] 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.
- [31] 门汝佳, 雷志鹏, 吝伶俐, 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.
- [32] 王少飞, 雷志鹏, 宋建成, 等. 温度对乙丙橡胶绝缘表面沿面放电特征的影响[J]. *绝缘材料*, 2018, 51(7): 41-48.  
WANG Shaofei, LEI Zhipeng, SONG Jiancheng, et al. Effects of temperature on surface discharge characteristics of ethylene propylene rubber insulation[J]. *Insulating Materials*, 2018, 51(7): 41-48.
- [33] HU Hao, JIA Zhidong, WANG Xilin. Aging mechanism of silicone rubber under thermal-tensile coupling effect[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2022, 29(1): 185-192.
- [34] 施江吉, 孙文杰, 马梓淇, 等. 预拉伸对介电弹性体复合材料介电性能和驱动性能的影响研究[J]. *绝缘材料*, 2016, 49(9): 66-71.  
SHI Jiangji, SUN Wenjie, MA Ziqi, et al. Influence of pre-stretch on dielectric property and actuating properties of dielectric elastomer composite[J]. *Insulating Materials*, 2016, 49(9): 66-71.
- [35] XU Deng, SRIDHAR V, MAHAPATRA S P, et al. Dielectric properties of exfoliated graphite reinforced fluoroelastomer composites[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2009, 111(3): 1358-1368.
- [36] 刘亚东, 陈思, 丛子涵, 等. 电力装备行业数字孪生关键技术与应用展望[J]. *高电压技术*, 2021, 47(5): 1539-1554.  
LIU Yadong, CHEN Si, CONG Zihan, et al. Key technology and application prospect of digital twin in power equipment industry[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(5): 1539-1554.
- [37] 马小平, 杨雪苗, 胡延军, 等. 人工智能技术在矿山智能化建设中的应用初探[J]. *工矿自动化*, 2020, 46(5): 8-14.  
MA Xiaoping, YANG Xuemiao, HU Yanjun, et al. Preliminary study on application of artificial intelligence technology in mine intelligent construction[J]. *Industry and Mine Automation*, 2020, 46(5): 8-14.