

不同压力和温度下电缆用乙丙橡胶绝缘的极化电流研究

龚华勇, 杨国涛, 严鹤翔

(国网浙江省电力有限公司丽水市莲都区供电公司, 浙江 丽水 323000)

摘要:为了研究压力和温度对电缆用乙丙橡胶绝缘电导性能的影响,本研究测量了不同电场强度、温度和压力下乙丙橡胶的极化电流,提取极化指数和电导率,分析了乙丙橡胶的性能变化规律。基于准稳态电导电流密度与电场强度的关系,研究了压力和温度对乙丙橡胶导电机制的影响。结果表明:极化指数和电导率与温度呈线性相关性,而与压力呈非线性相关性。这是因为受压力和温度影响,乙丙橡胶的导电机制发生了变化,温度升高可以促进乙丙橡胶中的载流子数目增多。较低的压力限制了乙丙橡胶分子间的运动,较高的压力会破坏分子链,导致电导率升高。

关键词:乙丙橡胶;热机械应力;极化电流;极化指数;电导率

中图分类号:TM215;TM247 **DOI:**10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2023.10.012

Study on polarization current of EPDM insulation for power cable under different pressure and temperature

GONG Huayong, YANG Guotao, YAN Hexiang

(Lishui Liandu Power Supply Company of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Lishui 323000, China)

Abstract: In order to study the effects of pressure and temperature on the conductivity of ethylene propylene rubber (EPDM) insulation for cables, the polarization current of EPDM under different electric field, temperature, and pressure were measured. The polarization index and conductivity were extracted, and the change law of the performance of EPDM was analyzed. The effect of pressure and temperature on the conduction mechanism of EPDM on pressure and temperature was studied based on the relationship between quasi-steady-state conductance current density and electric field intensity. The results show that the polarization index and conductivity are linearly related to temperature, but nonlinear related to pressure. This is because the conduction mechanism of EPDM changes under the influence of pressure and temperature, and the increase of temperature can promote the increase of the number of carriers in EPDM. The lower pressure limits the intermolecular movement of EPDM, while the higher pressure can destroy the molecular chain, resulting in an increase in electrical conductivity.

Key words: EPDM; thermal-mechanical stress; polarization current; polarization index; electrical conductivity

0 引言

乙丙橡胶(ethylene propylene diene monomer, EPDM)具有优异的抗氧化、耐臭氧、耐热、耐水和耐候特性,同时又保留了橡胶类材料固有的柔软性,被广泛应用于中、高压电缆,特别适用于煤矿、核电站、船舶等领域,其用量约占全部电缆的15%^[1-2]。在这些场合中,乙丙橡胶绝缘电缆常作为柔性电缆使用,在实际使用中不可避免地会受到电、热、机械等因素的联合作用^[3-5],有时还会伴随着辐射、水分、油等因素的影响,导致乙丙橡胶绝缘结构易产生缺陷,加速绝缘劣化,引发电缆故障。因此,研究各种

因子共同作用下乙丙橡胶绝缘性能的变化规律十分必要。

国内外学者已经开展了多因子作用下乙丙橡胶电缆绝缘性能的研究,其中针对电、热、辐照作用下乙丙橡胶绝缘性能变化规律的研究较多。如针对核电站中使用的乙丙橡胶电缆,学者们分析了不同辐照条件下受温度影响,乙丙橡胶的断裂伸长率、热性能、抗氧化程度、交联度和主链断裂等变化的原因和规律,结果表明,辐照和热老化会引起乙丙橡胶寿命降低,使其分子链中的主键断裂,形成烷基和碳基等自由基^[6-9]。此外,周长亮等^[10-11]对船用乙丙橡胶电缆绝缘在电和热因子作用下的性能进行了研究,建立了基于温度的寿命评估模型。王业等^[12]研究了挤压力和热因子作用下电缆绝缘用三

基金项目:国网丽水供电公司2021年集体企业科技项目(LSJTKJ-2021-2)。

元乙丙橡胶的介电频谱,发现挤压力和温度对直流电导率有明显影响,从而使乙丙橡胶的复介电常数发生变化。林晨等^[13]研究了电、热、挤压力联合老化后乙丙橡胶的极化去极化电流,给出了老化因子和低频介质损耗因数与老化时间的关系式。ZHOU L等^[14]研究了弯曲应力和热因子共同作用下高铁车载乙丙橡胶电缆的老化特性,得出严重的弯曲将导致乙丙橡胶的断裂伸长率下降,从而影响使用寿命。综上所述,国内外学者研究了不同因子作用下乙丙橡胶的理化、老化性能和部分介电性能,为理解不同因子作用下乙丙橡胶性能的变化规律起到了积极作用。然而针对应力造成的影响,多侧重于研究电、热、挤压或弯曲应力长时老化后介电性能的变化规律,既存在所施加机械应力水平较低,也存在介电性能研究不全面的问题。因此,有必要研究更多应力水平下乙丙橡胶绝缘各种介电性能的变化规律,为现场评估绝缘状态提供依据。

本研究针对多因子作用下柔性电缆用乙丙橡胶绝缘的导电性,重点研究压力和温度对乙丙橡胶绝缘极化电流的影响,测量并分析不同电场强度、压力和温度下乙丙橡胶的极化电流,基于极化指数和电导率分析极化电流的变化规律,讨论导电机理对极化电流的影响。

1 试验

1.1 试样制备

使用电缆用乙丙橡胶(XJ-30型,山东明联新材料有限公司)胶片^[15]制作试样,该胶片已经过密炼和滤橡,可直接用于乙丙橡胶电缆绝缘。制作试样时,首先用酒精清洁模具和胶片表面,将胶片在120℃的平板硫化机上预热1 min;之后在平板硫化机中热压硫化15 min,温度约为165℃,压力约为14 MPa。硫化结束后,尽快将胶片从模具中取出以防止过硫化,随后将其置于温度为80℃的真空干燥箱中烘焙24 h进行预处理,以消除硫化产生的副产物和机械应力。制得的乙丙橡胶圆片试样直径为100 mm、厚度约为0.6 mm。

1.2 极化电流测量原理及步骤

极化电流测量原理如图1所示。测量中使用三电极结构,其中测量电极用于测量极化电流,保护电极用于防止沿面泄漏电流对测量结果产生干扰。高压电极直径为40 mm,测量电极直径为25 mm。由于流过乙丙橡胶绝缘的是pA级的电流,为满足极化电流对测量精度的要求,选择KEITHLEY 6517B型静电计测量电流。此外,由于测量结果很

容易受到外部环境的干扰,在测量过程中,将试样和电极置于不锈钢屏蔽筒中,并放置于恒温干燥箱内,以屏蔽外部干扰,减小外部环境条件的影响。

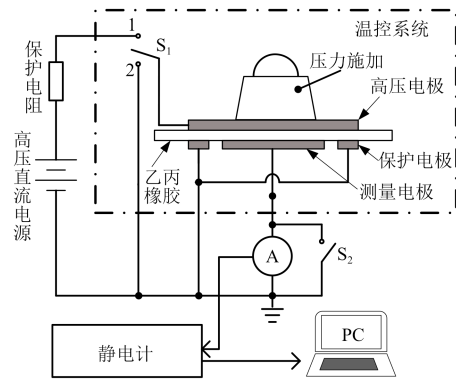


图1 极化电流测量原理图

Fig.1 Schematic diagram of polarization current measurement

通过恒温干燥箱控制温度,温控器控温精度为 $\pm 1^\circ\text{C}$,测量温度分别为30、60、90、120℃。通过在试样上施加不同质量的砝码控制施加于乙丙橡胶上的压力,施加的压力分别为200、400、600、800、1 000 kPa。极化电流测量电场强度分别为1、3、5、10、15、20、25 kV/mm。测量时,先在绝缘上施加相应的温度或压力,并静置30 min。施加压力后试样厚度会随受压程度不同发生变化,如图2所示。从图2可以看出,当压力为800 kPa时,试样的厚度减小约13%。因此,本文计算所施电场强度和电导率时使用的试样厚度均为温度和压力施加30 min后试样的厚度,从而减小厚度变化带来的误差。

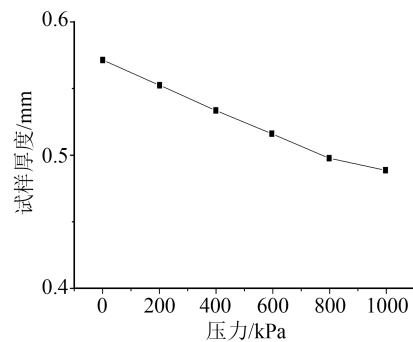


图2 试样厚度和压力的关系

Fig.2 Relationship between pressure and thickness of sample

待温度稳定后,在乙丙橡胶两端施加直流电压 U_{dc} ,即图1中的开关 S_1 切换至位置1,介质内部会发生极化现象,从而在乙丙橡胶中流过极化电流 $i_p(t)$ 。经过一定的极化时间后,将开关 S_1 切换至位置2,使乙丙橡胶短接,此时在乙丙橡胶内部流过去极化电流。在极化电流测量过程中,将静电计与计算机连接,每秒采集1次电流,一共采集600 s。每个电场

强度下的极化电流测量完毕后,将开关 S_1 切换至位置2,开关 S_2 闭合,使乙丙橡胶两端接地600 s后,进行下一个电场强度下的极化电流测量。

2 极化电流测量结果

2.1 不同压力下的极化电流

图3所示为温度为 30°C 时不同压力下乙丙橡胶的极化电流曲线。因为不同压力下极化电流曲线变化趋势类似,所以这里仅给出施加压力为0、400、600、1 000 kPa下的极化电流曲线。从图3可以看出,相同压力下,乙丙橡胶的极化电流均随着电场强度的增大而增大。

为进一步分析压力对极化电流的影响,分别计算了极化指数和电导率,如图4和图5所示。极化指数为60 s时的极化电流与600 s时的极化电流的比值,绝缘材料的极化指数一般大于2,当绝缘劣化或性能变差时,极化指数会变小。从图4可以看出,随着压力的增大,乙丙橡胶的极化指数均呈现先增大后减小的趋势。在约600 kPa时,极化指数最大。相同压力下,电场强度越高,极化指数越小,表明乙丙橡胶的性能正在逐渐下降。从图5(a)中不同压力下乙丙橡胶的电导率可以得出,施加相同电场强度时,随着压力的升高,乙丙橡胶电导率的变化趋势与极化指数相反,即呈现先减小后增大的趋势,在压力约为600 kPa时出现最小值。进一步分析图5(b),相同压力下,施加低电场强度时,电导率随电场增大而略微增大;当电场强度大于10 kV/mm后,电导率随电场强度升高而明显增大。这与不同电场下乙丙橡胶的导电机理相关,将在后续内容中讨论。

2.2 不同温度下的极化电流

图6为 30 、 60 、 90 、 120°C 下未施加压力时乙丙橡胶的极化电流曲线。从图6可以看出,相同温度下,乙丙橡胶的极化电流均随着电场强度的增大而增大,且随着测量时间的增加,极化电流快速衰减到稳定值,即电导电流。

进一步提取极化指数和电导率,如图7和图8所示。从图7可以看出,随着温度升高,极化指数整体呈现下降的趋势,且电场强度升高到5 kV/mm以后,施加的场强越高,极化指数越低。对比分析电场强度和温度对乙丙橡胶性能的影响可以发现,仅当电场强度为25 kV/mm时,所有测量温度下的极化指数小于2。但是也应注意到,不同电场强度下,随温度升高,极化指数的下降速率不同。从图8可以看出,随着温度升高,乙丙橡胶的电导率呈指数上升,且温度和电场强度越高,电导率的上升速率越快。当温度为 120°C ,电场强度为25 kV/mm时,

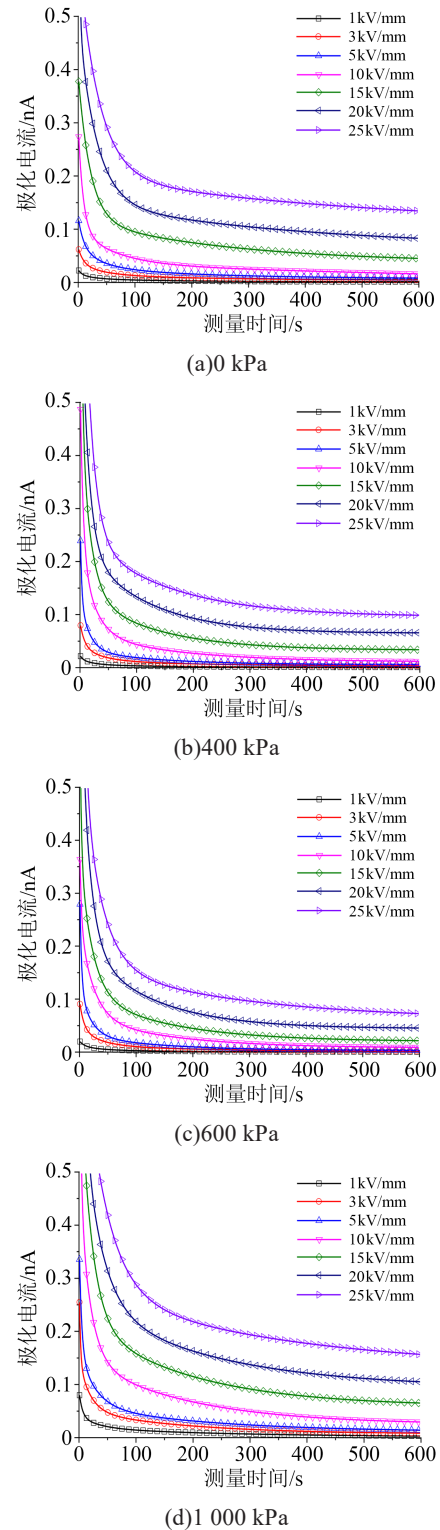


图3 不同压力下乙丙橡胶的极化电流

Fig.3 Polarization current of EPDM under different pressure

电导率达到 1.08×10^{-12} S/m。说明在高温和高场强下,乙丙橡胶的绝缘性能将变差,电导电流升高,即电导率升高,绝缘电阻降低。

2.3 不同压力和温度下的极化电流

由前述分析可知,极化指数和电导率能够更加清晰地反映不同压力和温度下乙丙橡胶的极化电

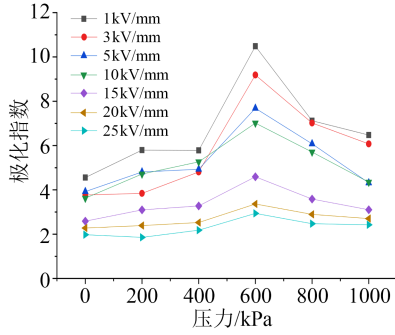
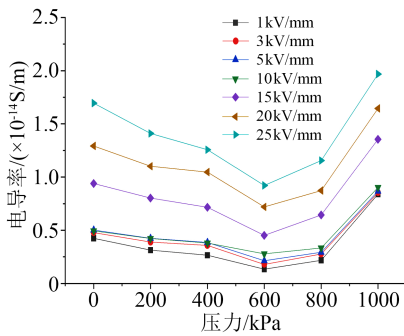
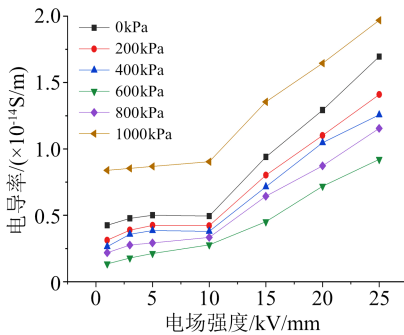


图4 不同压力下乙丙橡胶的极化指数

Fig.4 Polarization index of EPDM under different pressure



(a)电导率随外施压力的变化



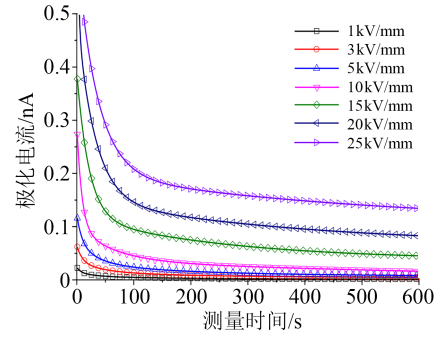
(b)电导率随外施电场强度的变化

图5 不同压力和场强下乙丙橡胶的电导率

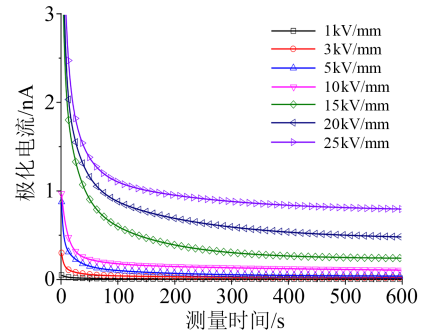
Fig.5 Electrical conductivity of EPDM under different pressure and electric field intensity

流特性。因此,后续分析压力和温度共同作用下的极化电流时,直接选取极化指数和电导率进行分析。

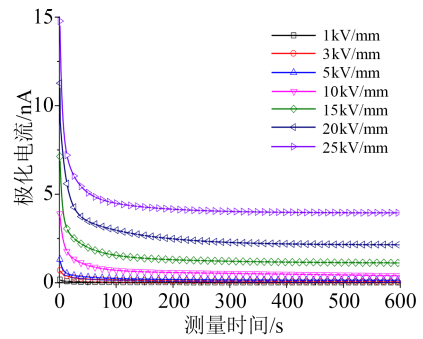
图9为施加电场强度分别为1 kV/mm和25 kV/mm时不同压力和温度下乙丙橡胶的极化指数。从图9(a)可以看出,不同温度下,随着压力升高,极化指数整体呈先增大后减小的趋势,在压力约为400 kPa时出现最大值。压力为1 000 kPa时,60、90、120℃下乙丙橡胶的极化指数均低于未施加压力时的极化指数,其中电场强度为1 kV/mm时60、90、120℃下乙丙橡胶的极化指数分别约为1.97、1.48、1.27,电场强度为25 kV/mm时分别约为1.21、1.10、1.08。从图9(b)可以看出,相同压力下,当压力较大



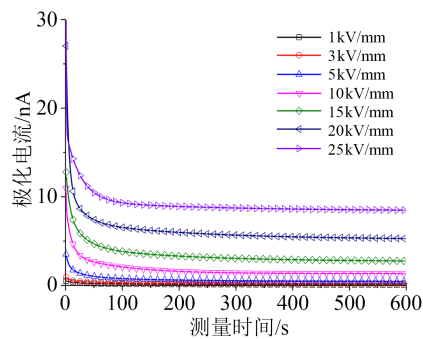
(a)30℃



(b)60℃



(c)90℃



(d)120℃

图6 不同温度下乙丙橡胶的极化电流

Fig.6 Polarization current of EPDM under different temperature

时,温度对乙丙橡胶的极化指数的影响变弱,但极化指数仍随温度升高而逐渐减小。结合图9(a)和(b)可以看出,当温度从60℃升高到120℃,压力为400 kPa时,电场强度为1 kV/mm下的极化指数从5.63降低为2.84,25 kV/mm下的极化指数从2.2降低为

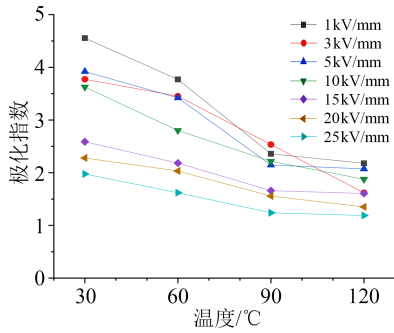


图7 不同温度下乙丙橡胶的极化指数
Fig.7 Polarization index of EPDM under different temperature

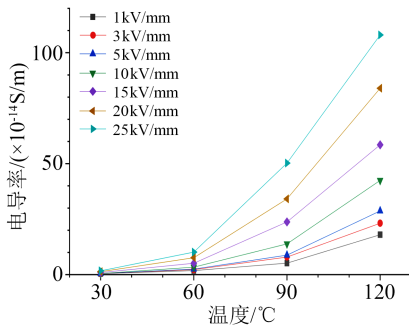


图8 不同温度下乙丙橡胶的电导率
Fig.8 Electrical conductivity of EPDM under different temperature

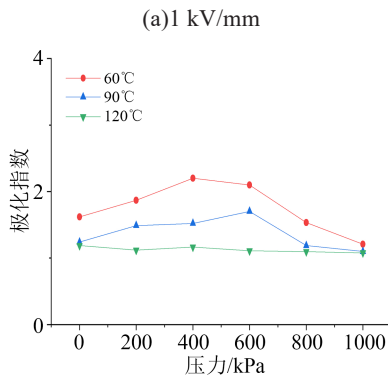
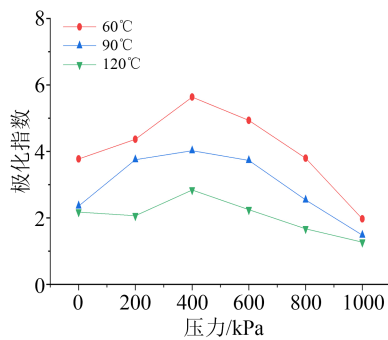


图9 不同压力和温度下乙丙橡胶的极化指数
Fig.9 Polarization index of EPDM under different pressure and temperature

1.17;压力为1 000 kPa时,1 kV/mm下的极化指数从1.97降低为1.27,25 kV/mm下的极化指数从1.21降

低为1.08。类似地,当温度升高后,压力对极化指数的影响也会减弱,特别是当温度为120 °C时,极化指数随压力升高仅出现轻微下降。

图10为不同压力和温度下乙丙橡胶的电导率。结合图5(a)可知,相同电场强度下,随着压力的升高,乙丙橡胶的电导率先减小后增大。此外,温度对电导率也有明显影响,即温度升高,电导率升高。从图10可以看出,当温度达到120 °C时,电导率随温度上升大幅升高,电场强度为1 kV/mm和25 kV/mm时分别达到 6.72×10^{-13} S/m和 3.34×10^{-12} S/m。

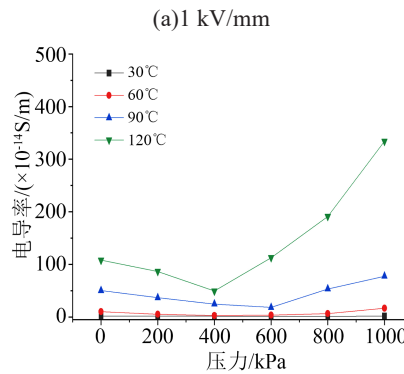
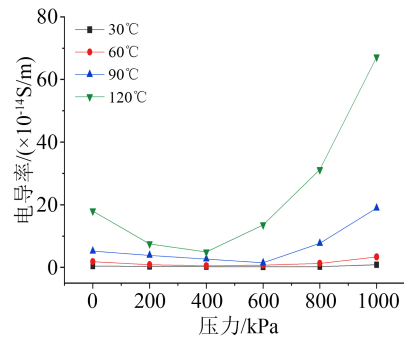


图10 不同压力和温度下乙丙橡胶的电导率
Fig.10 Electrical conductivity of EPDM under different pressure and temperature

3 讨论

不同压力和温度下乙丙橡胶绝缘的极化电流、极化指数和电导率的变化,与其导电机理相关。为分析导电机理,本文选取施加电压600 s时的电导电流作为稳态电流计算乙丙橡胶的准稳态电导电流密度 J_s ,如式(1)所示。

$$J_s = \frac{i_{\infty}(t)}{A_{mel}} \quad (1)$$

式(1)中: $i_{\infty}(t)$ 为加压600 s时的稳态电流值; A_{mel} 为测量电极的面积。

图11为90 °C时,不同压力下的准稳态电导电流密度与电场强度的关系曲线。不同温度下,准稳态电导电流密度与电场强度关系曲线类似。从图11

可以看出,准稳态电导电流密度呈现出分段变化的趋势。低场强时,压力作用明显,不同压力下的准稳态电导电流密度间隔较为分散;电场强度增大后,压力影响减弱,准稳态电导电流密度较为集中。如前所述,随着压力的升高,不同电场强度下的准稳态电导电流密度先减小后增大。在低场强(低于 10 kV/mm)下准稳态电导电流密度变化较缓。随着场强升高至某一阈值,准稳态电导电流密度迅速增大,这表明其导电机制发生了转变。

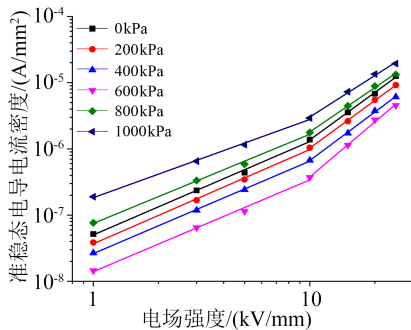


图 11 不同压力下乙丙橡胶的准稳态电导电流密度
Fig.11 Quasi-steady-state current density of EPDM at different pressure

低场强区与高场强区的两条拟合线的交点对应的电场强度表示空间电荷开始注入的阈值场强^[6],其值如表 1 所示。从表 1 可以看出,低场强区拟合直线的斜率接近 1,说明此时准稳态电导电流密度与场强之间存在线性关系,满足欧姆定律,处于欧姆电导区。而高场强区的拟合直线斜率接近 2,可知高场强区的电导特性满足空间电荷限制电流机制^[7]。这种随电场变化而出现非线性电导现象的主要原因有两方面:一是电场强度增大会降低电极和介质间势垒,使得注入的电子数量增多,并在试样内部局部区域积聚;另一方面,电场会增加陷阱中俘获的电子或使空穴热激发,在一定条件下深陷阱将被填满而不再捕获载流子,导致载流子克服势垒的约束而迅速增加。

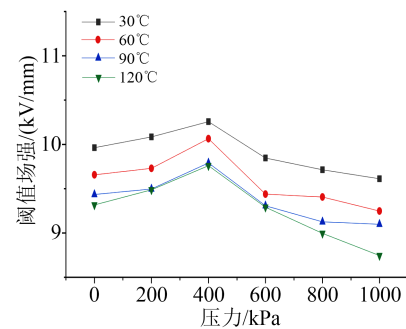
表 1 不同压力下的 J_s - E 曲线的参数

Tab.1 Parameters of J_s - E curves of EPDM at different pressure

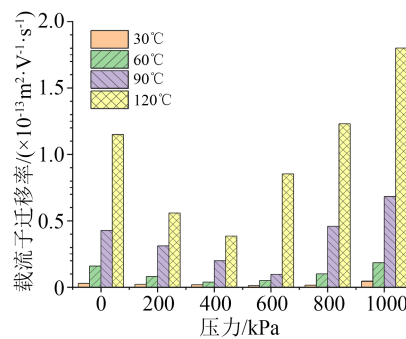
压力/kPa	0	200	400	600	800	1 000
低场区斜率	1.41	1.42	1.40	1.39	1.35	1.18
高场区斜率	2.38	2.39	2.43	2.37	2.23	2.08
阈值场强/(kV/mm)	9.43	9.50	9.79	9.31	9.13	9.10

图 12 为不同压力和温度下乙丙橡胶的阈值场强和载流子迁移率。阈值场强的高低与绝缘中参与导电的电荷数量相关。当外施电场超过阈值场

强后,电荷快速移动,电荷密度增大,电导电流密度上升,电导率增大,绝缘性能变差。从图 12 可以看出,随着压力的升高,阈值场强呈现出先增大后减小的趋势,在约 400 kPa 时乙丙橡胶的阈值场强达到最大值。一定程度上,施加较低的压力会限制乙丙橡胶分子链的运动,减弱载流子的传输,阈值场强升高,电导率降低。此外乙丙橡胶分子间距离减小,从而使得空间电荷注入量减小,也会导致阈值场强增大。随着压力的进一步增大,压力使乙丙橡胶向受力的垂直方向挤出,撕裂乙丙橡胶的趋势增大,加剧缺陷的形成,导致势垒降低。注入的电子更容易越过势垒参与电导输运,使得绝缘电导率升高,阈值场强降低。随着温度的升高,乙丙橡胶中的杂质受热而激发活化成为杂质离子并发生定向跃迁,或是杂质能级中的电子被激发,使得乙丙橡胶中能够参与电导过程的自由电荷密度呈指数增长。此外,根据肖特基注入理论,温度升高会增加载流子的动能,增大载流子浓度和载流子迁移率,使其更容易越过势垒而参与电导过程。因此随着温度升高,阈值场强呈下降趋势,且电导率增大。



(a) 阈值场强



(b) 载流子迁移率

图 12 乙丙橡胶的阈值场强和载流子迁移率

Fig.12 Threshold field strength and carrier mobility of EPDM

4 结论

(1)不同电场强度下,随着压力的升高,乙丙橡胶的极化指数先增大后减小,电导率先减小后增

大。与此不同,随着温度的升高,乙丙橡胶的极化指数逐渐减小,电导率呈指数升高。当压力较高时,温度对乙丙橡胶极化指数的影响变弱,但极化指数仍随温度升高而略微减小。类似地,当温度升高后,压力对极化指数的影响也会减弱。

(2)不同压力和温度下的准稳态电导电流密度与电场强度关系曲线均呈分段线性变化趋势,低场强区为欧姆电导区,高场强区满足空间电荷限制电流机制。导电性能变化的阈值点(即阈值场强)与压力和温度相关。

参考文献:

- [1] METWALLY I A. The evolution of medium voltage power cables [J]. IEEE Potentials,2012,31(3):20-25.
- [2] XU C, ZHAO R, LI C, et al. Significant enhancement in the electrical conductance properties of ethylene propylene diene monomer using the nano-SiO₂ particles[J]. High Voltage, 2021, 6(6): 487-494.
- [3] LIN L, LIN C, GENG P, et al. Aging life evaluation of coal mining flexible EPR cables under multi-stresses[J]. IEEE Access, 2020,8(1):53539-53546.
- [4] 孙宇飞,张青雨,云浩,等.基于PDC法的核级中压电缆老化状态研究[J].绝缘材料,2022,55(5):61-67.
- [5] 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.
- [6] 胡诗萌,杨振国.射线辐照对核用电乙丙橡胶绝缘材料的性能影响及损伤机理研究[J].复旦学报(自然科学版),2016,55(4): 496-503.
- [7] BURNAY S G. An overview of polymer ageing studies in the nuclear power industry[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research,2001,185(185):4-7.
- [8] CALMET J F, CARLIN F, NGUYEN T M, et al. Irradiation ageing of CSPE/EPR control command electric cables correlation between mechanical properties and oxidation[J]. Radiation Physics & Chemistry,2002,63(3):235-239.
- [9] FABIANI D, SURACI S V. Broadband dielectric spectroscopy: A viable technique for aging assessment of low-voltage cable insulation used in nuclear power plants[J]. Polymers, 2021,13(4):494.
- [10] 王志强,周长亮,李文文,等.船用丁基橡胶绝缘电缆剩余寿命评估[J].中国电机工程学报,2012,32(34):189-195,27.
- [11] 周长亮,王志强,李国锋.基于tan δ 积分值的乙丙橡胶绝缘电缆含水量评估[J].大连理工大学学报,2013,53(2):261-266.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] ZHOU L, LIU C, QUAN S, 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.
- [15] 全国电线电缆标准化技术委员会.电线电缆橡皮绝缘和橡皮护套第8部分:90℃橡皮绝缘:GB 7594.8—1987[S].北京:中国标准出版社,1988.
- [16] 王霞,王陈诚,孙晓彤,等.高温高场强下XLPE及其纳米复合材料电导机制转变的实验研究[J].中国电机工程学报,2016,36(7):2008-2017.
- [17] 赵瑞雪,门汝佳,徐晓晓,等.纳米SiO₂添加对乙丙橡胶相对介电常数和电导的影响[J].绝缘材料,2021,54(1):18-24.

收稿日期:2022-11-10;修回日期:2023-01-21。

作者简介:龚华勇(1980-),男(汉族),浙江丽水人,高级工程师,主要从事电力设备状态评价与检测的研究。