

浅议直流支撑电容器中的空间电荷问题

左强林, 雷乔舒, 严浩, 陆明林

(无锡赛晶电力电容器有限公司, 江苏 无锡 214177)

摘要: 本文从带电粒子在串联介质结构中的运动途径出发,分析直流支撑电容器中存在的Ⅰ型和Ⅱ型交界面上带电粒子的受力特点。分析计算气-膜交界面上带电粒子受到的电场力,阐释了油浸式电容器空间电荷问题不突出而干式金属化膜电容器空间电荷问题突出的根因在于设计场强;提出了完善元件热定型工艺和采用油浸渍工艺有利于改善介质结构空间电荷积聚效应。通过对加速老化试验电容器中的聚丙烯薄膜的击穿电压数据分析,验证了空间电荷注入对介质击穿电压的影响;通过对加速老化试验后金属化聚丙烯薄膜的空间电荷测量,验证了直流支撑电容器中,存在空间电荷注入。建议加强对直流支撑电容器薄膜中空间电荷及其影响规律的研究,找出边界,提升电容器的性能和运行可靠性。

关键词: 直流支撑电容器;空间电荷;串联介质

Discussion on Space Charge in DC-link Capacitor

ZUO Qianglin, LEI Qiaoshu, YAN Hao, LU Minglin

(Wuxi Sun King Power Capacitor Co., Ltd., Jiangsu Wuxi 214177, China)

Abstract: In this paper, the stress characteristics of charged particles at the interface of type I and type II in DC-link capacitors are analyzed from point view of the motion path of the charged particles in series dielectric structure. The electric field force of the charged particles at the gas-film interface is analyzed and calculated. It is explained that why the space charge problem is not prominent in oil-immersed capacitor but prominent in dry metallized film capacitor is because of the design field strength. It is suggested that improving the element heat setting process and using oil impregnation process can improve the space charge accumulation effect of medium structure. The influence of space charge injection on dielectric breakdown voltage is verified by the breakdown voltage data analysis of polypropylene film in accelerated aging test capacitor. By measuring the space charge of the metallized polypropylene films after accelerated aging test, the existence of space charge injection in DC-link capacitor is verified. It is suggested to strengthen the study of space charge in DC-link capacitor film and its influence, find out the boundary and improve the performance as well as operation reliability of capacitor.

Keywords: DC-link capacitor; space charge; dielectric in series

0 引言

目前空间电荷被广泛用于电介质的击穿和老化分析,特别是聚合物绝缘^[1-8]。由于空间电荷的常规测量方法^[9-10],如电声脉冲(pulse electro-acoustic, PEA)法和热刺激去极化电流(thermally stimulated depolarization current, TSDC)法等,都不能满足微米级薄膜的测量需要。

近年来,随着直流支撑电容器的发展,电容器的空间电荷问题开始进入电容器行业的视野。张冶文^[11-12]等人进行了固体绝缘介质中的空间电荷效应及应用研究,并率先进行了微米级厚度的聚丙烯薄膜空间电荷测量方法研究。郑飞虎^[13-14]等人提出了采用热脉冲法(TPM)测量微米级聚丙烯薄膜的空间电荷测量,取得了良好的效果。

按照电介质物理^[15],只要有交界面,就会有空间

电荷存在。但是长期以来电容器的空间电荷问题并不突出,这与油浸式电容器的场强不高有关。随着直流支撑电容器研究和应用的深入,自愈式电容器的击穿和自愈失效现象,越来越超出部分工程技术人员认知。在这种情况下,一些电容器研究人员开始用空间电荷的视角来分析绝缘材料的击穿问题。王霞^[16]等人对直流叠加冲击电压下 XLPE/EPDM 界面的空间电荷特性进行了研究。程璐^[17]等人对高压直流电场与谐波耦合作用下金属化膜电容器失效研究,分析了空间电荷对聚合物薄膜的危害。艾娜^[18]进行金属化 BOPP 膜电极特性及其对空间电荷运输影响研究,提出电荷积聚与电场分布相互影响、联系紧密,对外加电场有显著的依赖性。

干式直流支撑电容器是柔性直流输电阀组模块中的重要器件,随着中国柔性直流输电的发展,干式

直流支撑电容器的技术研发也达到空前热度^[19-21],直流支撑电容器的安全运行也受到极大关注。干式直流支撑电容器设计场强比较高,在膜-气交界面的特殊性,是空间电荷形成的根因^[22-23]。笔者在实践中也碰到了一些奇怪的自愈式电容器击穿现象,尝试从空间电荷的角度来分析,得到了一些印证。现在分享出来,希望更多的有识之士参与研究直流支撑电容器的空间电荷问题,从机理上分析、解决直流支撑电容器的空间电荷问题,提升直流支撑电容器的质量和运行可靠性。

1 串联介质中空间电荷积聚分析

1.1 电荷在介质及其交界面运动规律分析

分析介质结构交界面的空间电荷积聚,首先要从带电粒子在介质结构可能的运动途径开始。直流支撑电容器元件中的介质结构见图 1。

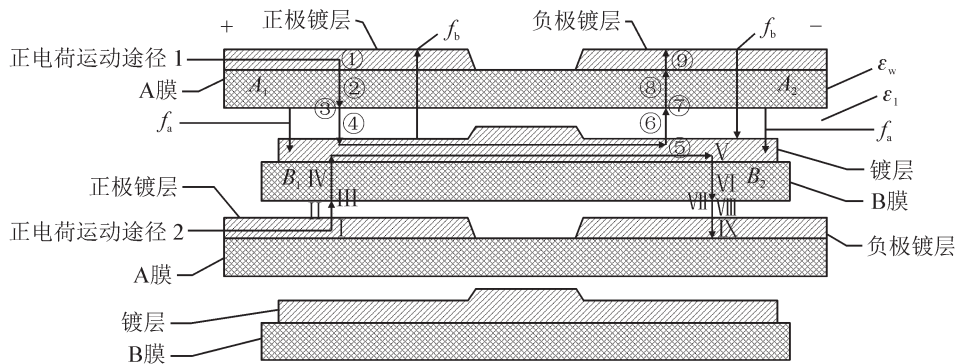


图1 电荷在复合介质中的运动途径示意图

Fig. 1 Schematic diagram of motion path of charge in a composite medium

为了分析方便,本文把交界面分为 2 种类型,即 I 型交界面和 II 型交界面。I 型交界面为相对介电常数大的介质对应于电源正极,类似于图 1 中的膜-气交界面;II 型交界面为相对介电常数大的介质对应于电源负极,类似于图 1 中的气-膜交界面。同时,本文把带正电荷的带电粒子称为正粒子,带负电荷的带电粒子称为负粒子。

图 1 中,正粒子可能的运动途径 1:正粒子在电场力的作用下,从上面 A 膜左边的正极镀层①穿越 A 膜②到达介质膜-气交界面③(I 型),进入气隙④,通过 B 膜的镀层到达 B 膜右边镀层⑤,进入右边气隙⑥到达气-膜交界面⑦(II 型),然后穿越 A 膜⑧到达负极 A 膜镀层⑨。

正粒子可能的运动途径 2:正电荷从下面 A 膜左边的正极镀层 I 穿越气隙 II 到达介质气-膜交界面 III(II 型),到 B 膜 IV,通过 B 膜镀层到达 B 膜的右边镀层 V,穿越 B 膜 VI 到达介质膜-气交界面 VII(I 型),进入右边气隙 VIII,然后穿越气隙 VIII 到达

负极 A 膜镀层 IX。

负粒子可能的运动途径从负极开始,与正电荷的运动次序相反,路径 1:⑨-⑧-⑦-⑥-⑤-④-③-②-①;路径 2:IX-VIII-VII-VI-V-IV-III-II-I。

1.2 带电粒子在交界面上的受力分析

根据电磁场理论^[24],2 层介质串联,其等效原理见图 2。

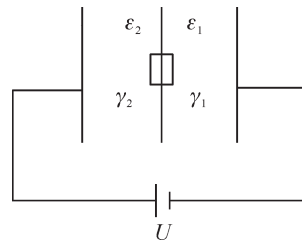


图2 带电粒子在介质交界面上受到的电场力示意

Fig. 2 Schematic diagram of electric field force of charged particle at dielectric interface

根据电磁场^[24]相关理论,电荷在串联介质受到的电场力分别为

$$f_1 = E_1 q \quad (1)$$

$$f_2 = E_2 q \quad (2)$$

由于在直流电压下的串联介质中,电导电流连续, $\gamma_1 E_1 = \gamma_2 E_2$, 式(2)可以变为

$$f_2 = E_2 q = \frac{\gamma_1}{\gamma_2} E_1 = \frac{\gamma_1}{\gamma_2} f_1 \quad (3)$$

这样 I 型交界面上带电粒子受到的力为

$$f_a = f_1 - f_2 = \left(1 - \frac{\gamma_1}{\gamma_2}\right) f_1 \quad (4)$$

式(1)-(4)中: f_1 、 f_2 分别为带电粒子在介质 1 和介质 2 中受到的电场力, Pa; γ_1 、 γ_2 分别为介质 1 和介质 2 的电导率; E_1 、 E_2 分别为介质 1 和介质 2 中的电场强度, MV/m; f_a 为电荷在交界面上受到的电场力, N。

1.3 带电粒子在 I 型和 II 型交界面的受力计算

根据 1.2 节的分析,带电粒子从正极到负极需要穿越气-膜和膜-气交界面,本文把类似电导率小对应正极性的膜-气交界面定义为 I 型交界面,电导率大对应正极性的气-膜交界面定义为 II 型交界面。

在电容器极板间,正电荷的受力方向为正极-负极,负电荷的受力方向为负极-正极。空间电荷的种类很多,本文把它归结为 2 种:带正电荷的带电粒子(以下简称正粒子)和带负电荷的带电粒子(以下简称负粒子)。为了分析方便,本文把从正极指向负极的方向定义为正向。

1) I 型交界面(膜-气交界面)

对于干式金属化膜电容器,介质 1 为聚丙烯薄膜,介质 2 为气隙。这个交界面是 I 型交界面。将 $\gamma_1 = 1 \times 10^{-15}$, $\gamma_2 = 3.3 \times 10^{-14}$ 代入式(4)可以得到

$$f_{a1} = \left(1 - \frac{10^{-15}}{3.3 \times 10^{-14}}\right) E_1 q \approx 0.97 q E_1 \quad (5)$$

式中, f_{a1} 为正粒子在 I 型交界面上受到的电场力。其余同前。

从式(5)可以看出,由于 f_{a1} 的值是正的,其方向是从正极指向负极,正粒子可以穿越 I 型交界面,不容易在 I 型交界面附近积聚。

对于负粒子,其运动方向就是从负极指向正极,所以负粒子不容易穿越 I 型交界面,容易在 I 型交界面附近积聚。

2) II 型交界面(气-膜交界面)

同理,正粒子在 II 型交界面上的综合受力为

$$f_{a2} = -\left(1 - \frac{1.0 \times 10^{-15}}{3.3 \times 10^{-14}}\right) E_1 q \approx -0.97 q E_1 \quad (6)$$

式中, f_{a2} 为正粒子在 II 型交界面上受到的电场力,方向从负极指向正极, N。其余同上。

从式(6)可以看出, f_{a2} 的值是负的,正粒子不

容易穿越 II 型交界面。由于负粒子的运动方向是从负极到正极,所以负粒子可以穿越 II 交界面。

根据上述分析,正粒子只能通过路径 1 穿越 I 型交界面到 B 膜,通过 B 膜镀层回到路径 2,穿越 I 型交界面回到负极。负粒子的运动则反过来。

综上,正粒子不容易在 I 型交界面上积聚,负粒子不容易在 II 型交界面上积聚,这是由交界面的性质决定的。

此外,从图 1 可以看到,如果元件的热定型效果比较好,存在气隙的面积很小,会在较大程度上降低空间电荷的风险。

1.4 油浸式电容器的空间电荷积聚分析

对于油浸式电容器,介质 2 为液体介质。由于液体介质的电导率大于聚丙烯薄膜的电导率,即 $\gamma_3 > \gamma_1$ 。这样油-膜交界面为 II 型交界面,膜-油交界面为 I 型交界面。液体介质以苜基甲苯为例,电导率为 $\gamma_3 = 10^{-7}$ 。代入式(4)可以得到正粒子在 I 和 II 型交界面上受到的电场力

$$f_{a3} = \left(1 - \frac{10^{-15}}{10^{-7}}\right) E_{1a} q \approx q E_{1a} \quad (7)$$

$$f_{a4} = -\left(1 - \frac{10^{-15}}{10^{-7}}\right) E_{1a} q \approx -q E_{1a} \quad (8)$$

式(7)-(8)中: f_{a3} 为正粒子在 II 型交界面上受到的电场力, N; f_{a4} 为正粒子在 I 型交界面上受到的电场力, N。其余同前。

从式(7)可以看出,正粒子在 II 型界面(油-膜)受到的电场力是正的,正粒子可以穿越 I 型交界面,不能穿越 II 型交界面。负粒子则相反,可以穿越 II 型油-膜交界面,不能穿越型膜-油交界面。

设直流支撑电容器的设计场强 $E_1 = 230$ MV/m,油浸式直流滤波电容器的设计场强为 $E_{1a} = 100$ MV/m,分别代入式(4)和式(7)可以得到

$$\frac{f_{a1}}{f_{a3}} = \frac{0.97 q E_1}{q E_{1a}} = \frac{0.97 \times 230}{100} = 2.23 \quad (9)$$

由于设计场强的差异,干式电容器在 I 型交界面上的受力是油浸式电容器的 2.23 倍,所以干式电容器的空间电荷问题比较突出。

2 直流支撑电容器的空间电荷影响验证

2.1 不同位置的金属化膜的击穿电压情况

为了验证自愈式电容器的空间电荷问题,笔者选取一台直流支撑电容器进行加速老化试验,然后截取部分金属化膜进行 50 点击穿电压试验,结果见表 1。表 1 中击穿场强均为活动区的击穿场强,加速老化试验后元件中金属化膜击穿场强分 A-、

A+、B-、B+ 4 种情况,分别对应 A 膜负极性、A 膜正极性、B 膜负极性、B 膜正极性。原材料和现卷元件因几种情况下击穿电压没有明显区别,合并取平均值。A 膜、B 膜如图 3 所示。

表 1 元件中金属化膜的击穿电压

Table 1 Breakdown voltage of metallized film in elements

名称	原材料	现卷元件	加速老化试验后元件			
			A-	A+	B-	B+
击穿场强/ (V/ μm)	621.7	609.2	600.5	640.1	593.7	632.8
偏差/%	1.00	-2.0	-3.4	+3.0	-4.5	+1.8

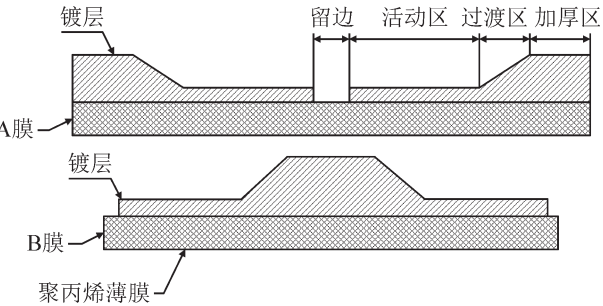


图 3 内 2 串设计的 A 膜和 B 膜示意
Fig. 3 Schematic diagram of film A and B film with 2 inter-series

从表 1 可以看出,元件卷绕后,金属化膜的击穿场强有轻微下降,这是正常的。加速老化试验,金属化膜的正极性击穿场强均有小幅提高,这应该与空间电荷注入有关;加速老化试验后金属化膜负极性击穿场强均有小幅下降,低于现卷元件;A 膜和 B 膜正极性击穿场强均比负极性击穿场强高 6.6%。

笔者认为,试验后元件不同部位金属化膜的击穿场强变化与空间电荷的注入有关,与元件所在的位置有关,与样膜在元件中所处的位置有关,与卷绕工艺有关,与热定型工艺有关。目前试验数据还太少,需要积累更多的数据。

2.2 金属化膜的空间电荷测量

空间电荷存在的最直接证据就是对金属化膜本身进行空间电荷测试。常规的空间电荷测试方法,目前没办法测量微米级的金属化膜,只能采用热脉冲法 TPM 测试。随机抽取元件解剖后对其金属化膜进行空间电荷测试发现,加速老化试验后,电容器中的元件内部存在空间电荷注入。空间电荷产生的电场畸变测试结果见图 4,电荷密度测试结果见图 5。图 4 和图 5 中,横坐标均为薄膜的厚度, μm ;图 4 的纵坐标为电场强度, $\text{V}/\mu\text{m}$;图 5 的纵坐标为电荷密度, $\mu\text{C}/\text{cm}^3$ 。

不同直径、不同位置金属化聚丙烯薄膜的空间电荷电场畸变和电荷密度测试结果见表 2。

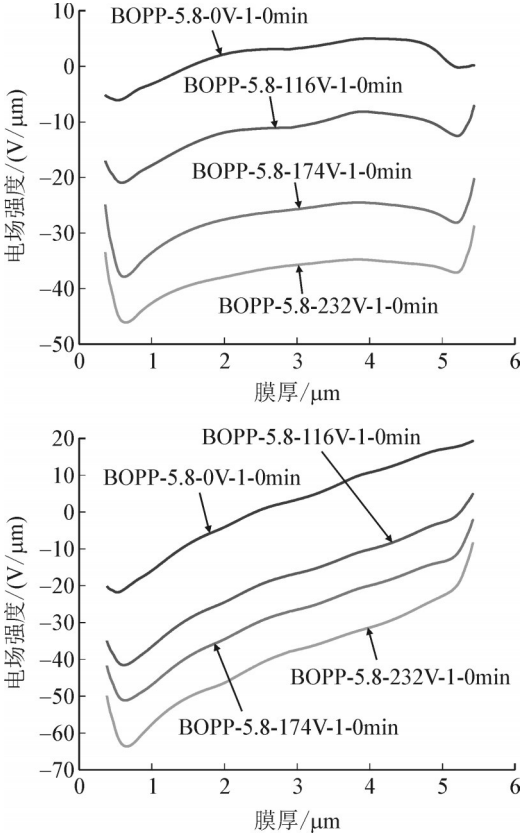


图 4 空间电荷对电场畸变测试结果
Fig. 4 Test results of space charge to electric field distortion

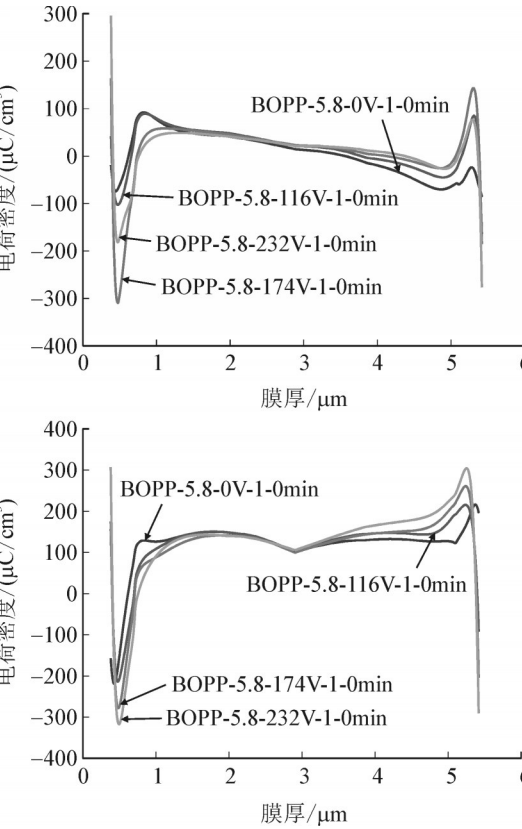


图 5 空间电荷密度测试结果
Fig. 5 Test results of space charge density

表2 空间电荷引起的电场畸变和电荷密度测试结果
Table 2 Test results of electric field distortion and charge density due to space charge

位置		元件直径 $\varphi 20$		元件直径 $\varphi 40$		元件直径 $\varphi 60$	
		A 膜	B 膜	A 膜	B 膜	A 膜	B 膜
电场畸变率/%	左侧(L)	3.08	6.52	5.91	11.51	7.62	5.61
	右侧(R)	11.10	19.95	15.20	13.73	7.72	7.58
电荷密度/ ($\mu\text{C}/\text{cm}^3$)	正极性左	91	200	160	153	363	133
	负极性左	70	0	51	0	0	0
	正极性右	215	530	194	138	138	220
	负极性右	210	0	0	0	0	0

从表2可以看出:1)金属化膜,不管是A膜还是B膜,都存在电场畸变,存在空间电荷注入;2)金属化膜右侧的电场畸变都比左侧大;3)除在元件较内层(元件直径 $\varphi 20$)A膜外,其余部位的几乎没有负极性电荷,比较符合前面的交界面带电粒子受力分析;4)B膜都没有负极性电荷存在,这个问题要引起重视;5)空间电荷的分布规律性不强,可能与下列因素有关:温度、压强、热定型工艺以及测试取样等有关。

想得到更有规律的空间电荷数据,还需要进行更多的研究。包括实际工程中正负极性接线、卷绕张力和热定型工艺、运行过程中的温度分布,还有如何在空间电荷测试中再现膜层间压强和温度等。

3 结语

1)串联介质中带电粒子交界面受力分析计算表明,带正电荷的粒子不能穿越II型(膜-气或油-膜)交界面,可以穿越I型(气-膜或膜-油)交界面;带负电荷的粒子则相反,不能穿越I型(气-膜或膜-油)交界面,可以穿越II型(膜-气或油-膜)交界面。由于设计场强高的原因,干式直流支撑电容器的空间电荷问题相对突出;

2)不能穿越的交界面上,容易造成某种空间电荷积聚,完善元件的热定型工艺有助于改善介质内部因空间电荷带来的电场畸变,降低空间电荷对电容器绝缘的危害;

3)通过不同位置的金属化膜的击穿场强数据表明,加速老化试验对电容器元件薄膜有影响,正极性击穿电压略高于负极性,而对原材料膜和新卷绕元件的膜,正负极性击穿电压没有区别。这与加速老化试验的空间电荷注入有关;

4)采用热脉冲法对金属化聚丙烯薄膜空间电荷测量结果表明,直流支撑电容器加速老化试验中存在空间电荷注入,有较大幅度的电场畸变。这个问题应引起业内人士的高度重视;

5)建议加强对直流支撑电容器中空间电荷积聚规律和对电容器破坏机理的研究,完善测试条件,改进制造工艺,提升直流支撑电容器的运行可靠性。

参考文献

[1] 尹毅,肖登明,屠德民. 空间电荷在评估绝缘聚合物电老化程度中的应用研究[J]. 中国电机工程学报,2002, 22(1): 43-48.
YIN Yi, XIAO Dengming, TU Demin. An application of space charge in valuing the electric ageing degree of insulating polymer[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 43-48.

[2] 郑飞虎,张治文,肖春. 应力对诱发空间电荷击穿的作用[C]//第十届全国工程电介质学术会议论文集. 成都, 2005.

[3] 郑飞虎,张治文,肖春. 聚合物电介质的击穿与空间电荷的关系[J]. 材料科学与工程学报,2006, 24(2):316-320.
ZHENG Feihu, ZHANG Yewen, XIAO Chun. Relationship between breakdown in polymer dielectrics and space charge[J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2006, 24(2): 316-320.

[4] G. CHEN. Space charge and its role in electrical breakdown of polymeric materials[C]//第十四届全国电介质学术会议论文集. 西安,2013.

[5] 李吉晓,张治文,夏钟福,等. 空间电荷在聚合物老化和击穿过程中的作用[J]. 科学通报,2000, 45(23):2469-2475.
LI Jixiao, ZHANG Yewen, XIA Zhongfu, et al. The effect of the space charge in the process of breakdown and aging of the polymer[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(23): 2469-2475.

[6] 赵妮,李盛涛. 夹层压制温度和压力对LDPE/LDPE绝缘体界面空间电荷特性的影响[C]//第十四届全国工程电介质学术会议. 南京,2013.

[7] 贾立敬,张建文,严家明,等. 添加剂对LDPE空间电荷的影响[C]//第十四届全国工程电介质学术会议. 南京,2013.

[8] 周文,郝春成,雷清泉. Fe3O4/CNFs/LDPE 半导体层对空间电荷注入的影响[C]//第十四届全国工程电介质学术

- 会议. 南京, 2013.
- [9] 陈枫. 聚合物绝缘电介质中的空间电荷[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2008.
- [10] 郑飞虎, 张治文. 绝缘电介质薄膜中空间电荷分布测量技术的研究进展[J]. 高电压技术, 2020, 46(7): 2460-2470.
- ZHENG Feihu, ZHANG Yewen. Progress in research on space charge distribution measurements in solid dielectric thin films[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(7): 2460-2470.
- [11] 张治文, 潘佳萍, 雷清泉, 等. 固体绝缘介质中的空间电荷效应及应用[J]. 科学通报, 2021, 66(Z2): 3695-3711.
- ZHANG Yewen, PAN Jiaping, LEI Qingquan, et al. Space charge effect and application in solid insulation dielectrics[J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(Z2): 3695 - 3711.
- [13] 张治文, 赵晖, 李宗泽, 等. 聚乙烯与聚丙烯中空间电荷注入特性的比较[J]. 高电压技术, 2014, 40(9): 2613-2618.
- ZHANG Yewen, ZHAO Hui, LI Zongze, et al. Comparison of space charge injection behaviors between polythene and polypropylene[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(9): 2613-2618.
- [14] FANG Jingying, ZHENG Feihu, CHEN Shijie. Space charge measurements for multilayer heterogeneous composite films by thermal pulse method[J]. Measurement 2024, 235(8): 115005.
- [15] LI Jiachen, ZHENG Feihu, CHEN Shijie. Relationship between prestress breakdown and space charge in micrometer-thin metalized polymer films[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2024, 31(5): 2389-2397.
- [16] 刘子玉, 陈季丹. 电介质物理[M]. 北京: 机械工业出版社. 2019.
- [17] 王霞, 崔伯男. 直流叠加冲击电压下XLPE/EPDM界面的空间电荷特性[J/OL]. 高电压技术, 1-9[2022-4-27].
- WANG Xia, CUI Bonan. Space charge characteristics of XLPE/EPDM interface under DC superimposed impulse voltage[J/OL]. High Voltage Engineering, 1-9[2022-4-27].
- [18] 程璐, 李志元. 高压直流电场与谐波耦合作用下金属化膜电容器失效研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(22): 8955-8965.
- CHENG Lu, LI Zhiyuan. Mechanism study on the failure of metallized film capacitor under HVDC field superimposed harmonics[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(22): 8955-8965.
- [19] 艾娜. 金属化BOPP膜电极特性及其对空间电荷输运影响研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2024.
- [20] 左强林, 雷乔舒. 柔性直流输电用直流支撑电容器的关键技术研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(1): 108-115.
- ZUO Qianglin, LEI Qiaoshu. Study on the key technics of DC-link capacitor for flexible HVDC transmission[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1): 108-115.
- [21] 李维维, 高琪, 芦锋. 柔性直流输电工程用直流支撑电容器的开发探讨[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38(3): 95-98.
- LI Weiwei, GAO Qi, LU Feng. Discussion on the development of DC-link capacitor for flexible HVDC transmission project[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(3): 95-98.
- [22] 何晓靓, 高琪, 刘水平, 等. 大容量柔性直流输电工程用直流支撑电容器技术研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(4): 81-85.
- HE Xiaoliang, GAO Qi, LIU Shuiping, et al. Study on DC support capacitor technology for high power flexible DC transmission project[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(4): 81-85.
- [23] 电力电子电容器: GB/T 17702—2021[S]. 2021.
- Capacitors for power electronics: GB/T 17702—2021[S]. 2021.
- [24] Capacitors for power electronics: IEC 61071: 2017[S]. 2017.
- [25] 冯慈璋. 静态电磁场[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1985.
- 作者简介:**
- 左强林(1967—), 男, 正高级工程师, 主要从事电力电容器设计制造工作。E-mail: zuoql@sunking-tech.com。
- 雷乔舒(1979—), 女, 高级工程师, 主要从事电力电容器设计制造工作。E-mail: leijs@sunking-tech.com。
- 严浩(1994—), 男, 助理工程师, 主要从事电力电容器质量管理。
- 陆明林(1992—), 男, 助理工程师, 主要从事电力电容器设计制造工作。