第 52 卷 第 7 期：3417-3425 高电压技术 Vol.52, No.7: 3417-3425
2026 年 7 月 31 日 High Voltage Engineering July 31, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250586

高温对聚四氟乙烯绝缘的空间电荷积聚及击穿特性的影响

王冰洁，吴 锴
（电工材料电气绝缘全国重点实验室(西安交通大学)，西安 710049）

摘 要：在高温下，聚合物的击穿强度和储能密度将急剧下降，这极大地限制了聚合物基介电电容器的进一步发展。空间电荷积聚是引起聚合物绝缘电场畸变，威胁其击穿强度和储能密度的重要因素。该文改进了 PEA 测试装置和击穿测试平台，最高测试温度可达到 200 ℃。测试了聚四氟乙烯(PTFE)在 90~180 ℃下的空间电荷分布以及在 25~180 ℃的交直流击穿特性。研究了高温对聚合物空间电荷特性和击穿特性的影响。研究表明，PTFE 在 150 ℃以下没有明显的电荷注入。高于 150 ℃ 时，阳极会注入大量正电荷，并以空间电荷包的形式向阴极迁移。电荷积聚引起 PTFE 内部电场畸变，最高可达 1.8 倍。PTFE 的直流击穿场强随着温度的升高先增大后降低。而交流击穿场强随温度的升高仅呈现降低趋势，且直流时下降更显著。高温和直流下，PTFE 击穿场强的显著降低是由其体内空间电荷包的积聚和迁移导致的电场畸变引起的。

关键词：高温；聚四氟乙烯；绝缘；空间电荷；击穿

Effect of High Temperatures on Space Charge Accumulation and Breakdown Characteristics of Polytetrafluoroethylene Insulation

WANG Bingjie, WU Kai
(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment(Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, China)

Abstract: At high temperatures, the breakdown strength and energy storage density of polymers will drop sharply, which significantly limits the further development of polymer-based dielectric capacitors. The accumulation of space charges at high temperatures is a crucial factor causing electric field distortion in polymer insulation, posing a threat to its break-down strength and energy storage density. In this paper, the PEA (pulsed electro-acoustic) testing device and break-down testing platform were improved, enabling tests at temperatures up to 200 ℃. The space charge distribution of polytetra-fluoroethylene (PTFE) was measured at temperatures ranging from 90 to 180 ℃, and its AC (alternating current) and DC (direct current) breakdown characteristics were investigated from 25 to 180 ℃. The influences of high temperatures on the space charge characteristics and breakdown properties of the polymer were studied. The research reveals that PTFE exhibits no significant charge injection below 150 ℃. Above 150 ℃, a substantial number of positive charges are in-jected from the anode and migrate to the cathode in the form of space charge packets. Charge accumulation in PTFE induces significant electric field distortion within the material, reaching up to 1.8 times the original field intensity. The DC breakdown strength of PTFE exhibits a non-monotonic temperature dependence, initially increasing and then decreasing with rising temperature. In contrast, the AC breakdown strength shows a continuous downward trend over the same tem-perature range, with the DC degradation being more pronounced. The significant reduction in breakdown field strength of PTFE at high temperatures and under DC conditions is attributed to electric field distortion caused by the accumulation and migration of space charge packets within the material.

Key words: high temperature; polytetrafluoroethylene; insulation; space charge; breakdown

0 引言

聚合物类电介质材料具有击穿场强高、柔韧性良好、高可靠性、价格低廉等优点[1-2]。近年来，随着混合电动汽车，新能源发电、航空电子工业以及石油勘探等领域的快速发展，人们对高温介电电容器的要求日益增加[3-6]。例如，混合动力汽车的功率逆变器的工作温度能达到 140 ℃[7]。在石油勘探中，电子设备的工作温度甚至高达 200 ℃[8]。最近，有关开发高温(200 ℃以上)储能用介电聚合物的研究

基金资助项目：智能电网重大专项(2030)(2024ZD0802402)。
Project supported by Smart Gird-National Science and Technology Major Project (2030) (2024ZD0802402).

层出不穷[9-10]。诸如聚酰亚胺(PI)、聚醚醚酮(PEEK)和聚醚酰亚胺(PEI)等耐高温的特种工程塑料有望开发出额外的功能，从而制作出能够满足现代和未来技术需求的功能性聚合物电介质。

在高温下，聚合物的击穿强度和储能密度将急剧下降，这极大地限制了聚合物基介电电容器的进一步发展[11]。如何兼顾高耐受电压、高工作温度以及小型化成为未来电能储存和转换器件发展的关键难题[12]。因此，提升聚合物在高温下的绝缘可靠性至关重要。值得注意的是，在高温高直流场下，聚合物中极易注入电荷，空间电荷在决定电场畸变、击穿强度和储能密度方面起着至关重要的作用[13-14]。电荷注入、迁移、复合等过程也会造成绝缘分子链的破坏，从而使绝缘击穿[15-17]。因此有必要研究聚合物在高温下的空间电荷特性和击穿特性，指导新型高温聚合物介电材料的开发和应用。

目前，国内外在聚合物在高温下的空间电荷特性和击穿特性的研究较少。最早，日本武藏工业大学 Y. Tanaka 课题组曾用铌酸锂材料开发了高温空间电荷测试装置初步研究了聚对苯二甲酸乙二醇酯(polyethylene terephthalate, PET)膜的高温空间电荷分布[18]。后该课题组又采用聚偏氟乙烯(polyvinylidene fluoride, PVDF)的衍生物P(VDF-TrFE)传感器结合水冷系统开发了具有超高分辨率的高温空间电荷测试系统[19]。国内，彭宗仁课题组利用 P(VDF-TrFE)传感器结合电极加热元件开发了测试范围在室温到 110 ℃的空间电荷测量系统[20]。廖瑞金课题组曾通过交联聚乙烯试样在不同温度下的击穿和耐压试验，指导了 66 kV 海缆绝缘厚度设计[21]。然而，以上研究的测试温度均不超过 150 ℃，仍缺乏更高温度下聚合物绝缘的空间电荷及击穿特性研究。

本文改进了电声脉冲法(PEA method)测试系统和击穿测试平台，最高测试温度可达到 200 ℃。测试了聚四氟乙烯(polytetrafluoroethylene, PTFE)在90~180 ℃下的空间电荷分布以及在 25~180 ℃的交直流击穿特性，研究了高温对聚合物空间电荷特性和击穿特性的影响。

1 试验内容

1.1 试样选择和制备

本文采用商用的PTFE薄膜，切割直径为8.5 cm的圆形平板试样。用于空间电荷测试的样品厚度为0.30 mm，用于击穿的样品厚度为 0.15 mm。试验前以上试样均在 80 ℃和真空环境中静置 24 h 以消除水分的影响。上述所有样品均产自同一生产批次，且厚度均匀。

1.2 高温空间电荷试验

本文搭建了能用于 25~200 ℃的高温空间电荷测量装置，其示意图如图 1 所示。本装置由高压直流源、脉冲源、电极系统、温控系统和信号采集系统等组成。考虑到常用的 β 相的 PVDF 传感器材料的最高使用温度低于 100 ℃，不适用于高温下的空间电荷测试。因此，选用具有超高居里温度(>1 000 ℃)的商用铌酸锂($LiNbO_3$)晶体作为压电传感器材料。PVDF-β 和铌酸锂的相关物理性质如表 1 所示[20]。本文采用了上海光机所生产的厚度为 90 μm 的 $LiNbO_3$ 薄片。为了提高空间分辨率，通过研磨和抛光将 $LiNbO_3$ 的厚度减小到 70 μm。结果表明，改进后的 PEA 装置在高温下的空间分辨率可达 20 μm，精度达到 0.3 ℃/m³，且波形质量良好。

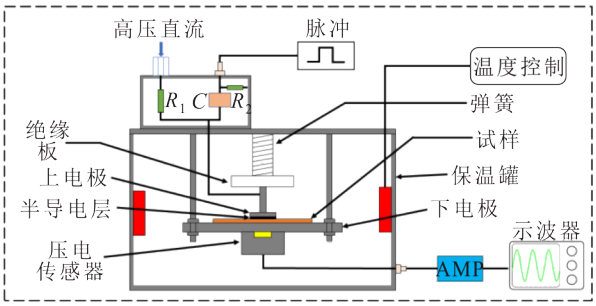


图 1 高温 PEA 测量系统示意图

Fig.1 Diagram of the high-temperature PEA measurement system

表 1 PVDF-β 和铌酸锂的物理性质

Table 1 Properties of PVDF-β and $LiNbO_3$

物理性质参数	数值	
	PVDF-β	$LiNbO_3$
声速 v/(m·s^{-1})	2 260	7 360
声阻抗 Z/(N·s·m^{-3})	4.02	34.6
相对介电常数 ε_r	6.2	39
压电电压常数 g_{33}/(10^{-3}·V·m·N^{-1})	327.9	17.4
性能综合评价系数 Kg_{33}/(10^{-3}·V·m·N^{-1})	124.6	23.1
最高使用温度 T/℃	90	1 210(居里点)
市售产品厚度 L/μm	>5	>50

此外，为了防止声波在压电传感器中的反射，还使用了声阻抗与其相近的紫铜(声阻抗为 42 N·s/m³)作为传感器片的支撑材料。试样和电极系统被放置于一个保温罐中，以保持温度稳定和电磁

屏蔽。温控系统采用比例积分微分(PID)控制方法，通过铂 100 温度传感器实时监测样品温度，有效控温范围为 25~200 ℃，控温精度可达到 0.1 ℃。脉冲源的幅值约为 1 kV，脉冲宽度为 20 ns。耦合电容、耦合电阻、保护电阻和信号放大器放置于保温罐外，

避免高温对其参数的影响。高压极为半导电极(SC 极)，材料选用掺了炭黑的聚酰亚胺，低压极为铝电极。测试时，使用耐高温的油作为声耦合剂。通过计算机 LABVIEW 程序对数据进行采集和处理。

空间电荷试验的测试温度设定为 90、120、150 和 180 ℃，直流电场强度设定为 30 kV/mm 和 50 kV/mm。测试时，待电极和样品的温度稳定后，先加压 1 h，后短路 30 min，采集该过程试样的空间电荷波形。

1.3　高温击穿试验

高温击穿测试系统示意图如图 2 所示。击穿试验平台采用型号为 BDJC-100 kV 的电压击穿试验仪，可分别进行交流和直流下平板试样的击穿实验。试验温度分别为 25、60、90、120、150、180 ℃。采用对称的球状铜电极作为测试电极，球电极直径为 20 mm。为避免电极对电场畸变的影响，每次测试前均将电极擦拭干净。通过高温烘箱加热二甲基硅油控制样品的试验温度。试验过程中，试样和电极系统均浸没在耐高温的二甲基硅油中，可有效减少击穿过程中沿面闪络的发生。每次测试时，使用高温烘箱将试样和电极加热到指定温度并稳定 10 min 以上才开始加压，以确保温度的准确性。试验时，升压速率均设定为 1 kV/s，平台信号采集系统的交流系数设定为 0.98，直流系数设定为 0.74。

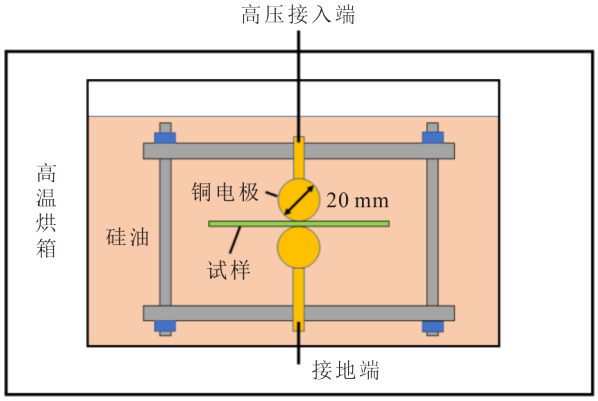


图 2　高温击穿测试系统示意图

Fig.2　Diagram of the high-temperature breakdown measurement system

此外，考虑到样品击穿具有分散性，选取 10 个样品进行重复实验并根据 Weibull 分布计算等效击穿场强。

1.4　热性能试验

本文采用差示扫描量热分析仪(DSC)对 PTFE 试样进行热分析测试。测试时的温度变化过程如图 3 所示，升温速率和降温速率均为 10 ℃/min。

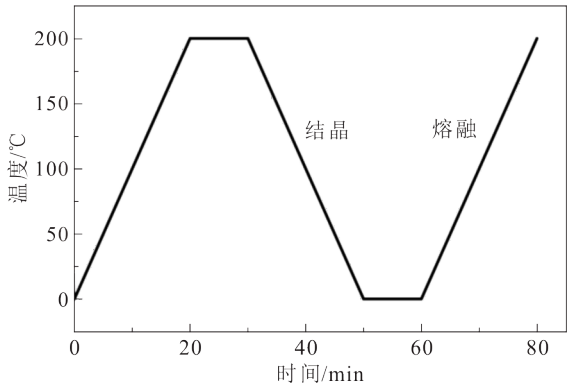


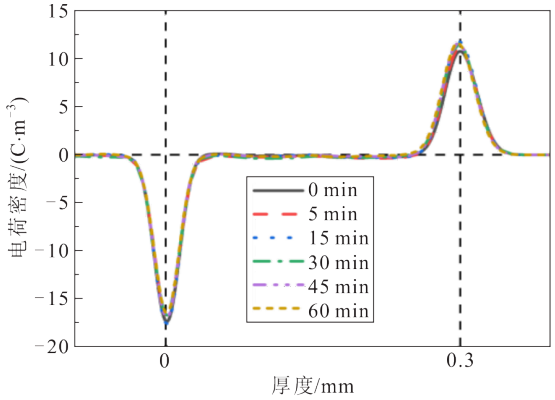
图 3　DSC 试验测试温度变化曲线

Fig.3　Temperature variation curve during DSC test

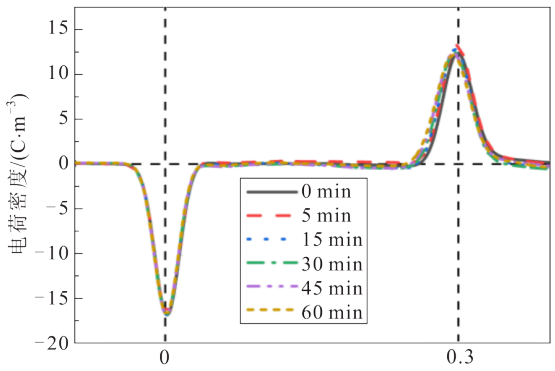
2　试验结果

2.1　空间电荷测试结果

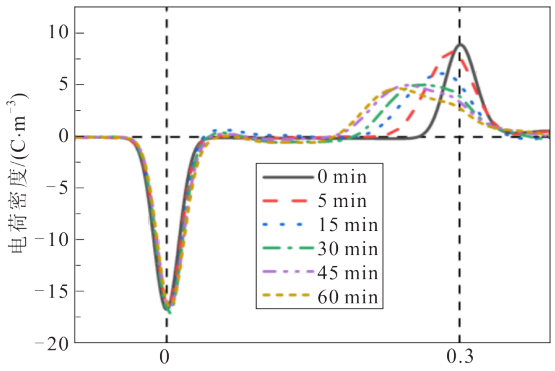
图 4 为 PTFE 在不同温度和 30 kV/mm 下的空间电荷分布结果。图 5 为 PTFE 在不同温度和 50 kV/mm 下的空间电荷分布结果。不难看出，当测试温度低于 120 ℃时，在 30 kV/mm 和 50 kV/mm 下，PTFE 中都没有明显的电荷注入，仅在高压极附近有极少量的异极性电荷积聚。而当测试温度升高到 150 ℃时，高压极开始向试样注入大量正电荷。值得注意的是，注入的电荷形成了空间电荷包，并从高压极向低压极移动。空间电荷包现象是一种较为独特的空间电荷行为，空间电荷包的迁移会导致电介质内部的局部电场发生起伏变化，加速电介质材料的击穿与损坏[22-23]。不仅如此，可以观察到，阴极附近也开始逐渐积聚少量的异极性电荷。在 180 ℃和 50 kV/mm 条件下，高压极注入的电荷包峰值达到 7 C/m^3，低压极附近的异极性电荷峰值也有 2.5 C/m^3 左右。这将会增大阴极附近的电场，进一步加剧电荷注入和迁移。相关研究表明，聚丙烯在常温和 30 kV/mm 下 10 h 积聚的空间电荷包峰值达到 5 C/m^3 左右[23]。PTFE 在 80 ℃和 20 kV/mm 下积聚的异极性电荷峰值达到 0.55 C/m^3 左右[24]。考虑到不同样品之间可能存在的差异以及本研究的测试温度和电场均更高的影响，上述测试结果是较为准确的。此外，不难发现，在相同温度下，PTFE



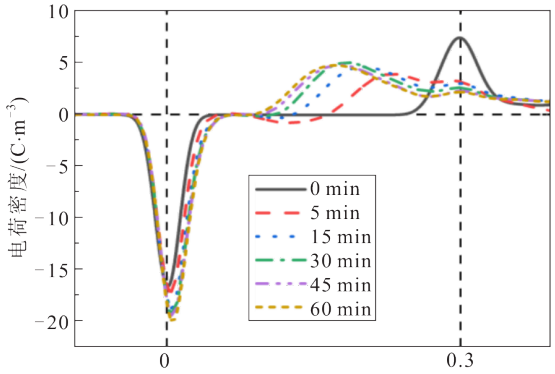
(a) 90 ℃时空间电荷分布



(b) 120 ℃时空间电荷分布



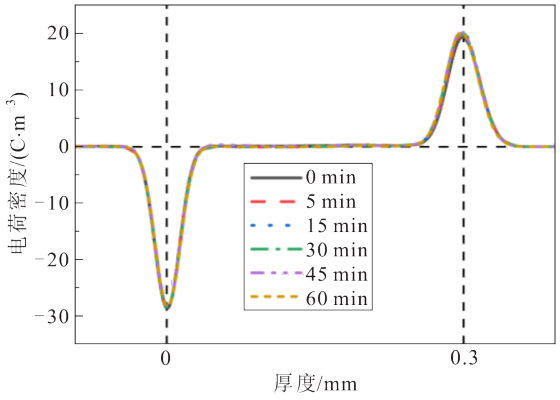
(c) 150 ℃时空间电荷分布



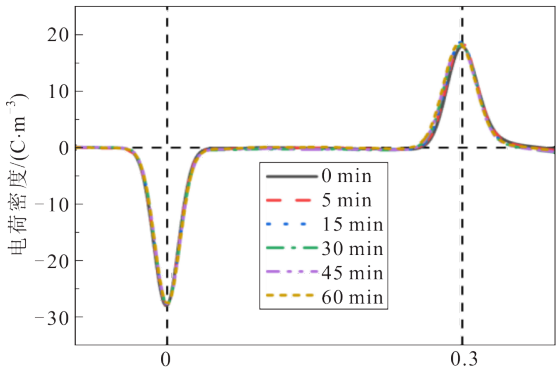
(d) 180 ℃时空间电荷分布

图 4 PTFE 在不同温度和 30 kV/mm 下的空间电荷分布

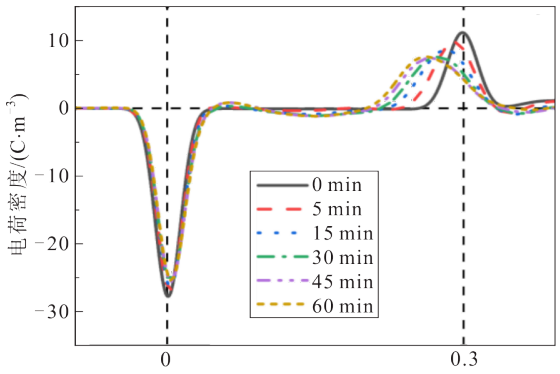
Fig.4 Space charge distribution of PTFE at different temperatures and 30 kV/mm



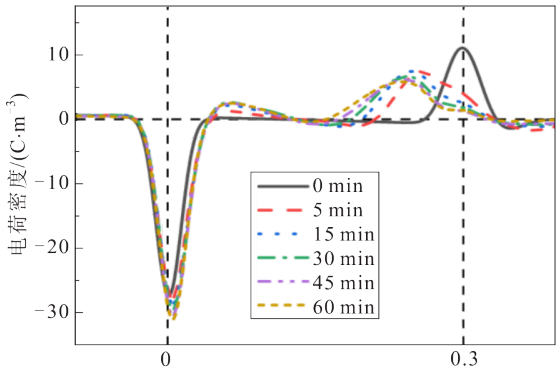
(a) 90 ℃时空间电荷分布



(b) 120 ℃时空间电荷分布



(c) 150 ℃时空间电荷分布



(d) 180 ℃时空间电荷分布

图 5 PTFE 在不同温度和 50 kV/mm 下的空间电荷分布

Fig.5 Space charge distribution of PTFE at different temperatures and 50 kV/mm

在两种电场下的电荷分布十分相似。电场变化对PTFE中空间电荷分布的影响要比温度的影响小得多。

空间电荷在聚合物内部的输运受多种因素影响，其运动速度是材料微观结构、环境响应及外场作用的综合结果。而且，空间电荷的积聚涉及众多的物理过程，包括载流子的注入、抽出、输运、入陷、脱陷、杂质电离和复合等，这些物理过程相互制约和影响。迁移率是描述载流子输运能力的关键参数。空间电荷包在PTFE内部的移动速度可以侧面反映其电荷迁移率的大小。从图4和图5的结果不难发现，即使在180 ℃，PTFE内部空间电荷包的迁移速度也十分缓慢，这表明PTFE材料在高温下也具有比较低的电荷迁移率。

通过加压时间和对应的空间电荷包的注入深度可以计算PTFE试样内部空间电荷包的平均移动速度。表2列出了不同时间段PTFE中空间电荷包的平均移动速度。根据表2数据，在4种试验条件下，空间电荷包的迁移速度均随加压时间的推移呈现逐渐下降趋势。尤其是在180 ℃和50 kV/mm时，45~60 min阶段的平均移动速度仅为0~5 min阶段的1%。这也是电荷包在1 h后无法到达阴极的原因。因此，阴极积聚的异极性电荷量相对较小。其中一个原因可能是PTFE的电荷迁移率很低，阳极注入的电荷在1 h内并不足以迁移到阴极。另一个原因是大量的同极性电荷会大大减小高压极附近的电场。因此，电荷包的移动速度会随着时间和同极性电荷量的增加而减慢。而且，不难发现，当温度不变时，随着电场的增加，电荷包迁移速度略有降低，这表明PTFE材料在产生空间电荷包时，出现了负微分迁移率现象。负微分迁移率模型认为，外加电场产生的应力改变了聚合物的微观结构，其引起的浅陷阱密度变化对载流子有效迁移率有重要影响，使得载流子迁移速度随电场升高而减小。PTFE的这一表现与聚乙烯、聚丙烯等材料具有一定的相似性[22-23]。因此，对于载流子迁移率受陷阱调制的绝缘材料，载流子的负微分迁移率现象可能具有普遍性。此外，随着温度的增加，电荷包的移动速度大幅增大，在30 kV/mm时，180 ℃的加压初期移动速度是150 ℃时的7倍之快。这表明，温度升高后，空间电荷包移动的速度也随之加快，注入深度也越深。

表2　PTFE内空间电荷包的平均移动速度

Table 2　Average movement speed of space charge packets in the PTFE

时间/min	150 ℃下的平均移动速度 v_a/(μm·min^{-1})		180 ℃下的平均移动速度 v_a/(μm·min^{-1})	
	30 kV/mm	50 kV/mm	30 kV/mm	50 kV/mm
0~5	1.873	1.826	13.489	8.849
5~15	0.994	0.923	2.810	0.856
15~30	1.327	0.513	1.405	0.285
30~45	0.918	0.461	0.937	0.190
45~60	0.714	0.359	0.468	0.076

2.2　交直流击穿测试结果

击穿性能是衡量绝缘材料电气强度的重要指标。固体电介质击穿场强具有一定的随机性和分散性，一般都采用双参数威布尔(Weibull)统计分布的方法来进行分析，基于两参数Weibull分布模型的绝缘失效分布函数表达式[25]为：

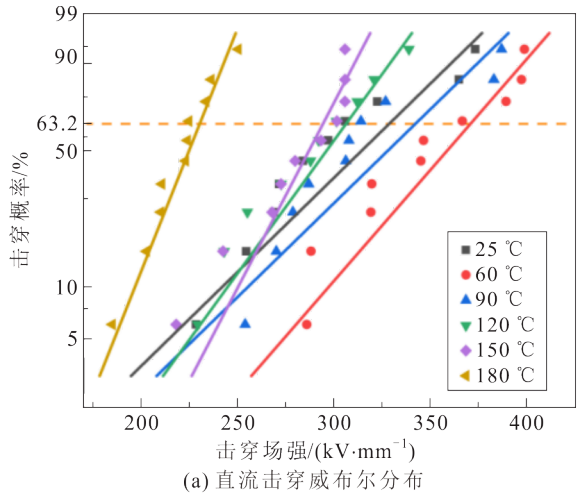
$$F = 1 - \exp(-(E_b/\alpha)^{\beta}) \tag{1}$$

式中：E_b为击穿场强测试值；α为Weibull分布拟合计算的特征击穿场强，其对应累计击穿概率为63.2%；β为Weibull分布的形状参数，其大小与测试数据点的分散程度有关，其值越小代表击穿场强数值越分散。通过击穿试验获得的数据样本对绝缘失效分布函数中的α、β进行估计，进而获取Weibull分布模型。经验分布函数P采用中位秩估计，表达式为：

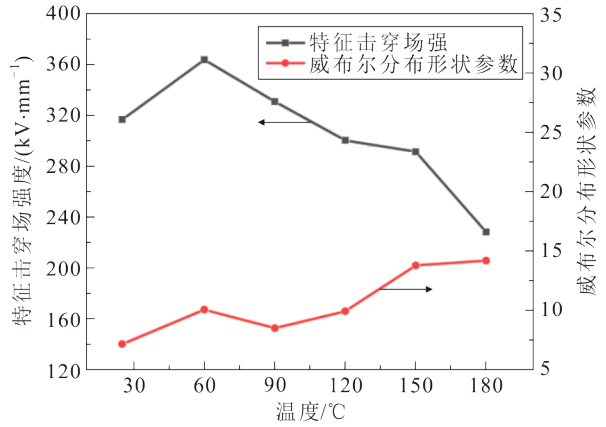
$$P = \frac{i - 0.3}{n + 0.4} \times 100\% \tag{2}$$

式中：i代表测试试样的序号；n代表样本容量。图6(a)和图7(a)分别为PTFE在不同温度下的直流击穿试验和交流击穿试验结果的威布尔统计分布。图中横坐标为电场强度，纵坐标为通过经验分布函数获得的击穿场强对应的击穿概率，虚线与拟合曲线的交点代表失效概率为63.2%时的电场强度，即对应的特征击穿场强。由图6(a)可知，在直流下，随着温度的升高，威布尔分布曲线先向右移后向左移，

且曲线斜率略有增大，即PTFE直流击穿场强随温度升高呈先增大后减小的趋势。相较于25 ℃，在60 ℃时，直流击穿场强最大；从90 ℃开始，直流击穿场强随温度的升高呈下降趋势；在180 ℃时，直流击穿场强大幅度降低。这表明，在25~60 ℃范围内，PTFE的结晶度与相态结构基本不变，但温度升高加剧了晶格振动。该振动导致自由电子迁移过程中与晶格碰撞频率显著增加，缩短了电子弛豫时间，进而降低其迁移率。由于迁移率下降，自由电子在电场加速下累积的动能减少，难以达到击穿阈值能量，最终使PTFE的击穿场强在此温区呈现反常升高趋势。温度继续升高后，一方面，材料



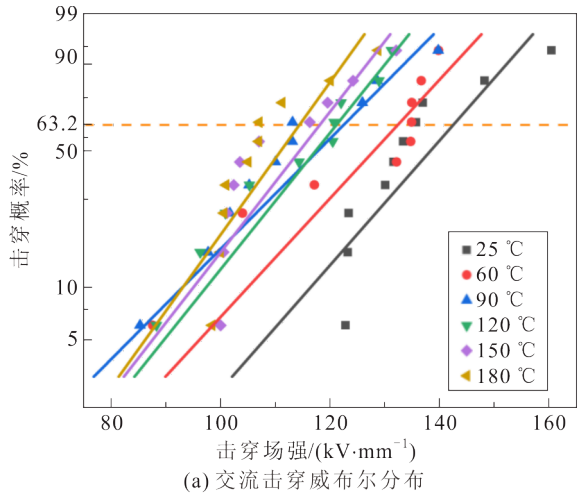
(a) 直流击穿威布尔分布



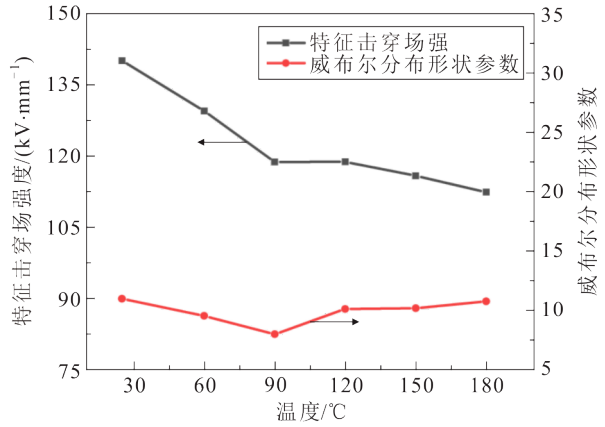
(b) 直流特征击穿场强和威布尔分布形状参数

图 6 PTFE 在不同温度和直流下的击穿试验结果

Fig.6 Breakdown test results of PTFE at different temperatures and DC



(a) 交流击穿威布尔分布



(b) 交流特征击穿场强和威布尔分布形状参数

图 7 PTFE 在不同温度和交流下的击穿试验结果

Fig.7 Breakdown test results of PTFE at different temperatures and AC

的体积逐渐增大，增大了自由电子的平均自由行程，导致其击穿场强下降。另一方面，空间电荷积聚导致的局部电场畸变也使得击穿场强大幅度降低。由图 7(a)可知，在交流下，威布尔分布曲线随温度的增大逐渐左移，PTFE 的交流击穿场强随温度的升高逐渐下降，且在 25~90 ℃范围内下降明显，在 90~180 ℃时，交流击穿场强相近。这一规律与直流下有所不同。

图 6(b)和图 7(b)为 PTFE 分别在直流、交流下的特征击穿场强和威布尔分布形状参数的结果。由图 6(b)可知，PTFE 在直流下的威布尔分布形状参数随温度的升高整体呈上升趋势，在 180 ℃时，能达到 14.1。高温环境下，直流击穿场强的数据离散度显著降低，这表明温度升高增强了空间电荷对直流击穿的主导作用。高温下空间电荷的规律性调控效应掩盖了材料本征缺陷的随机影响，导致击穿场强数据的集中性优化。此外，由图 7(b)可知，交流时的威布尔分布形状参数随温度变化并不明显，其值仅在 10 附近浮动，这说明交流击穿场强数据的分散性对温度变化没有在直流时敏感。

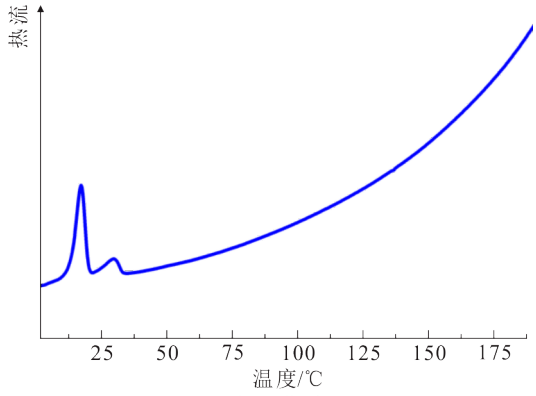
2.3 DSC 测试结果

PTFE 的 DSC 测试结果如图 8 所示。由图 8 可知，本文所用的 PTFE 的结晶峰和熔融峰均出现在 21 ℃附近，低于空间电荷的测试温度。在 90~180 ℃范围内，PTFE 并没有发生相变。由此可见，PTFE 在高温下依然具有优异的热稳定性。

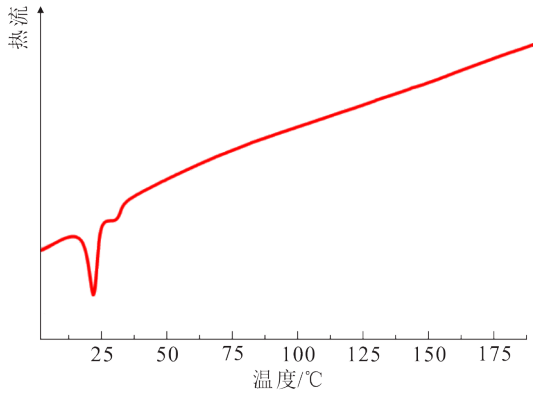
3 分析与讨论

3.1 温度对空间电荷积聚的影响

如前文所示，PTFE 材料在 150 ℃前后的空间电荷积聚特性明显不同。在测试温度低于 150 ℃时，仅有极少量的空间电荷积聚。在测试温度达到 150 ℃后，阳极开始注入大量的正电荷，在阳极附近形成同极性的空间电荷包，阴极附近积聚了少量



(a) 结晶曲线



(b) 熔融曲线

图 8　PTFE 的 DSC 试验结果

Fig.8　DSC test results of PTFE

的异极性电荷。造成该现象的原因可能是高温加剧了界面处的电荷注入和杂质电离。一方面，在温度低于 150 ℃时，PTFE 作为一种超强绝缘材料具有较高的注入势垒，电荷注入均不明显。在温度高于 150 ℃时，电极界面处的注入势垒均开始显著降低，电荷注入均明显增大。另一方面，本研究所用的材料为商用的 PTFE 薄膜，考虑到产品工艺的影响，材料本身可能内含少量杂质，在高温和电场的作用下会发生电离。在温度达到 150 ℃后，电离开始明显增多，产生了大量的正离子和电子。高温同样增大了电极抽出，电子具有较高的迁移率，很快便迁移到正极被抽出。而正离子则积聚在样品内部难以消散，其与注入的电荷互相叠加，在阳极形成了空间电荷包，在阴极形成了少量的异极性电荷积聚。

在本文中，为了研究温度对 PTFE 电荷积聚的影响，我们计算了 PTFE 平均电荷密度随时间的变化，并对空间电荷的积聚量 q 进行了定量表征，其计算式如下：

$$q=\frac{1}{d}\left(\int_0^d|\rho(x,t)|\mathrm{d}x-\int_0^d|\rho(x,0)|\mathrm{d}x\right) \tag{3}$$

式中：d 为试样厚度；t 为时间；$\rho(x,t)$为材料在 x 位置和 t 时刻的总电荷密度；$\rho(x,0)$为材料在 x 位置和 t 时刻的总电荷密度；积分范围定义为从低压极/PTFE 界面位置到 PTFE/高压极界面位置。PTFE 在不同温度和 30 kV/mm 条件下短路时的平均电荷密度随时间的变化规律如图 9 所示。可以发现，在 90 ℃和 120 ℃时，PTFE 积聚的电荷总量很少。短路 1 s 时，平均电荷密度只有 1 C/m^3 左右，可以很快地消散。而当温度继续升高后，积聚的电荷量开始显著增加，到 180 ℃时，短路 1 s 时，平均电荷密度仍还有 4.6 C/m^3。且温度越高，相同时间内消散的电荷总量越大；温度越高，电荷完全消散所需的时间越长。以上结果表明，PTFE 在温度低于 150 ℃时具有良好的电荷阻挡效应，注入的电荷量很少，空间电荷积聚对其绝缘性能的影响可以忽略。值得注意的是，由图 8 可知，PTFE 在高温下具有稳定的热性能。其在温度升高后的空间电荷积聚量陡增并不是由于相变引起的。其低压极附近的异极性电荷积聚与高温下正电荷注入、内部电荷电离和迁移有关。因此，在其使用温度高于 150 ℃时，需要考虑空间电荷效应对其的不利影响。

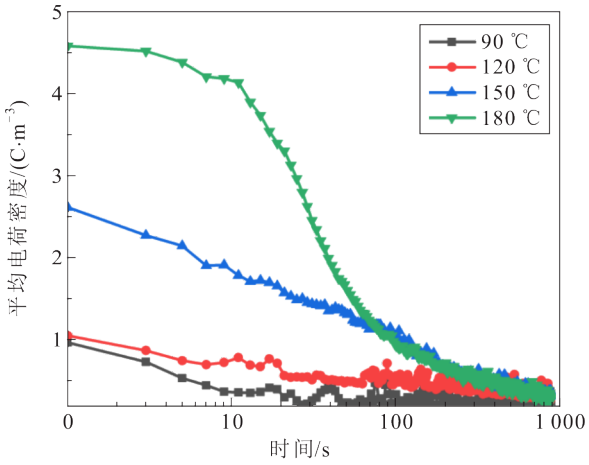


图 9　PTFE 在不同温度和 50 kV/mm 下短路时的平均电荷密度分布

Fig.9　Average charge density distribution of PTFE in short circuit at different temperatures and 50 kV/mm

3.2　空间电荷对击穿的影响

为了进一步明确高温下空间电荷积聚对直流电场的影响，计算了极化 60 min 时 PTFE 试样内部的最大电场畸变率 χ_E。其表达式为：

$$\chi_E=\frac{E_{\max}}{E_0}\times 100\% \tag{4}$$

式中：$E_{\max}$为通过加压 1 h 时的空间电荷密度计算得

到的最大电场强度；E_0 为测试时施加的初始电场强度。计算结果如图 10 所示。从图 10 中可以看出，在 150 ℃以下时，样品内部的最大电场畸变率均小于 1.1。这表明 PTFE 在 150 ℃以下时直流绝缘性能优异，可以忽略空间电荷积聚的负面影响。当温度达到 150 ℃时，最大电场畸变率开始迅速增加。而且，在 30 kV/mm 时，最大电场畸变率略高于 50 kV/mm 时。在 30 kV/mm 和 180 ℃时，试样内部的最大电场甚至可增至初始电场的 1.8 倍，这将严重威胁 PTFE 的绝缘稳定性和绝缘寿命。因此，明确聚合物绝缘材料在高温下的空间电荷积聚特性十分重要。

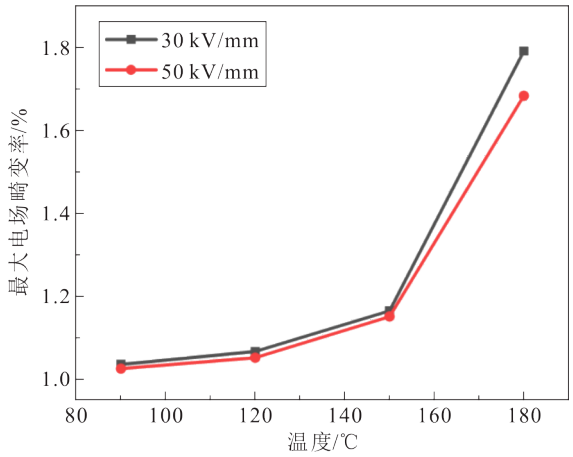


图 10 PTFE 在不同温度下的最大电场畸变率

Fig.10 Maximum electric field distortion rate of PTFE at different temperatures

许多研究表明，高场下介质的击穿与空间电荷复杂的动力学行为密切相关[26-27]。空间电荷包的形成是击穿发生的前期过程。空间电荷包的迁移及该过程造成的电场畸变是击穿发生的中间过程。因空间电荷积聚引起的电场畸变会导致电介质内部电子加速、电荷量倍增和能量积聚，进而引发电介质分子链被破坏是击穿发生的最后阶段。空间电荷积聚造成电介质内部电场畸变是击穿的重要影响因素，这也是电介质材料交流击穿和直流击穿存在差异的主要原因[28]。

由上文可知，在温度高于 150 ℃时，高压极注入的大量正电荷在试样内部形成了空间电荷包，并从高压极向低压极迁移。较低的电荷迁移率使得空间电荷包难以快速迁移到对电极进而被电极抽出。因此，积聚在试样内部的大量电荷导致电场大幅畸变，温度越高，最大电场畸变率越大。局部电场的增大会大大增加绝缘损伤的风险。此外，空间电荷在聚合物内部的反复脱陷、入陷也会造成能量的储存与释放，最终导致宏观上绝缘材料产生损伤与破坏。由图 6 和图 7 可知，在同样的升压速率和温度变化下，分别比较直流和交流下 180 ℃与室温时的特征击穿场强结果。不难发现，交流下，特征击穿场强下降了 19.77%；而直流下，特征击穿场强下降了 27.92%。PTFE 在直流下的击穿强度随温度升高下降的比交流时更显著。相较于交流情况，直流下，PTFE 击穿场强随温度升高后的显著降低是由于其体内空间电荷包的积聚和迁移导致的电场畸变引起的。研究电介质材料在高温下的空间电荷积聚特性和输运机理对指导新型高温聚合物介电材料的开发和应用至关重要。

4 结论

1）PTFE 在 150 ℃以下没有明显的电荷注入。高于 150 ℃时，阴极积聚少量的异极性电荷，阳极会注入大量正电荷，并以空间电荷包的形式向阴极迁移。温度越高，电荷包迁移速度越快，注入深度也越深。

2）高温下积聚的空间电荷引起 PTFE 局部电场畸变。在 150 ℃以下时，样品内部的最大电场畸变率均小于 1.1。在温度高于 150 ℃后，电场畸变率开始显著增大，样品内部的最大电场甚至可增至初始电场的 1.8 倍。

3）PTFE 的交直流击穿场强的温度依赖性呈现显著差异。PTFE 的直流击穿场强随着温度的升高先增大后降低。而交流击穿场强随温度的升高仅呈现降低趋势，且直流时下降更显著。180 ℃结果与室温时相比，交流下，特征击穿场强下降了 19.77%；而直流下，特征击穿场强下降了 27.92%。

4）相较于交流情况，直流下，PTFE 击穿场强随温度升高后的显著降低是由于其体内空间电荷包的积聚和迁移导致的电场畸变引起的。研究电介质材料在高温下的空间电荷积聚特性和输运机理对指导新型高温聚合物介电材料的开发和应用至关重要。

参考文献 References

[1] 张志成，张美荣. 耐高温聚合物基储能电介质材料的研究进展[J]. 高电压技术，2024，50(6)：2309-2318.
ZHANG Zhicheng, ZHANG Meirong. Research progress of high-temperature resistance polymer-based energy storage dielectric materials[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(6): 2309-2318.

[2] MAO J L, WANG S, CHENG Y H, et al. High energy storage density and efficiency achieved in dielectric films functionalized with strong electronegative asymmetric halogen-phenyl groups[J]. Chemical En-

gineering Journal, 2022, 444: 136331.
[3] JOHNSON R W, EVANS J L, JACOBSEN P, et al. The changing automotive environment: high-temperature electronics[J]. IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, 2004, 27(3): 164-176.
[4] WEIMER J A. Electrical power technology for the more electric aircraft[C]//Proceedings of the AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference. Fort Worth, USA: IEEE, 1993: 445-450.
[5] 杜潇丹，肖萌，宋玉宁，等. 基于辐照交联改性的电容器用聚丙烯薄膜介电性能[J]. 高电压技术，2024，50(10)：4601-4610.
DU Xiaodan, XIAO Meng, SONG Yuning, et al. Dielectric properties of polypropylene film for capacitor based on irradiation crosslinking modification[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(10): 4601-4610.
[6] LI Q, YAO F Z, LIU Y, et al. High-temperature dielectric materials for electrical energy storage[J]. Annual Review of Materials Research, 2018, 48: 219-243.
[7] LI Q, CHEN L, GADINSKI M R, et al. Flexible high-temperature dielectric materials from polymer nanocomposites[J]. Nature, 2015, 523(7562): 576-579.
[8] WATSON J, CASTRO G. High-temperature electronics pose design and reliability challenges[J]. Analog Dialogue, 2012, 46: 1-7.
[9] GURNANI R, SHUKLA S, KAMAL D, et al. AI-assisted discovery of high-temperature dielectrics for energy storage[J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 6107.
[10] KIM J, SAREMI S, ACHARYA M, et al. Ultrahigh capacitive energy density in ion-bombarded relaxor ferroelectric films[J]. Science, 2020, 369(6499): 81-84.
[11] PAN Z Z, LI L, WANG L N, et al. Tailoring poly (styrene-co-maleic anhydride) networks for all-polymer dielectrics exhibiting ultrahigh energy density and charge-discharge efficiency at elevated temperatures[J]. Advanced Materials, 2023, 35(1): 2207580.
[12] 肖萌，陈毓妍，赵亦烁，等. 高压直流金属化薄膜电容器绝缘性能提升方法研究进展[J]. 高电压技术，2024，50(6)：2319-2331.
XIAO Meng, CHEN Yuyan, ZHAO Yishuo, et al. Research progress in improving insulation properties of HVDC metalized film capacitor[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(6): 2319-2331.
[13] 高路，徐浩，吕泽鹏，等. 油纸复合绝缘组成类型对电荷输运特性的影响[J]. 高电压技术，2025，51(1)：309-321.
GAO Lu, XU Hao, LÜ Zepeng, et al. Effect of composition of oil-paper insulation on charge transport characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(1): 309-321.
[14] 姚欢民，穆海宝，李鹤，等. 不同频段下 IGBT 自组装非线性绝缘材料介电性能的温度依赖性[J]. 高电压技术，2025，51(1)：322-335.
YAO Huanmin, MU Haibao, LI He, et al. Temperature dependence of dielectric properties of self-assembled nonlinear insulating materials for IGBTs under different frequency bands[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(1): 322-335.
[15] 马志鹏，李宁一，陈新岗，等. 考虑空间电荷效应的步进应力法获取 XLPE 绝缘直流电压耐受指数[J]. 高电压技术，2025，51(2)：925-935.
MA Zhipeng, LI Ningyi, CHEN Xingang, et al. Obtaining DC voltage endurance coefficient of XLPE insulation by step stress method considering space charge effect[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(2): 925-935.
[16] 杨俊，吴建东，罗响，等. 方波脉冲电场参数对聚酰亚胺中空间电荷特性的影响[J]. 高电压技术，2025，51(3)：1413-1421.
YANG Jun, WU Jiandong, LUO Xiang, et al. Influence of square wave pulsed electric field parameters on the space charge characteristics of polyimide[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(3): 1413-1421.
[17] 王启隆，陈向荣，贺新钧，等. 直流和方波电压下有机半导电小分子/硅弹性体纳米复合材料的高温空间电荷特性[J]. 电工技术学报，2024，39(19)：6187-6200.
WANG Qilong, CHEN Xiangrong, HE Xinjun, et al. Analysis of high-temperature charge dynamics of organic semiconductor/silicone elastomer nanocomposites under DC and square wave voltages[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(19): 6187-6200.
[18] ISHIZAKI S, MIYATAKE K, TANAKA Y, et al. Space charge accumulation process in PET film at high temperature under high electric stress[C]//Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Cancun, Mexico: IEEE, 2002: 660-663.
[19] SATO K, KONISHI S, MIYAKE H, et al. Measurement of space charge distribution in epoxy resin package at high temperature under high DC stress[C]//2019 IEEE International Workshop on Integrated Power Packaging. Toulouse, France: IEEE, 2019: 30-35.
[20] 宁鑫，彭宗仁，刘鹏，等. 一种适用于高温条件下的电声脉冲法空间电荷测量系统[J]. 中国电机工程学报，2017，37(6)：1835-1842.
NING Xin, PENG Zongren, LIU Peng, et al. An improved pulsed electro-acoustic setup for space charge measurement at high temperatures[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(6): 1835-1842.
[21] 王泽瑞，赵学童，赵远涛，等. 66 kV 交联聚乙烯海底电缆绝缘厚度设计[J]. 高电压技术，2023，49(6)：2634-2643.
WANG Zerui, ZHAO Xuetong, ZHAO Yuantao, et al. Insulation thickness design of 66 kV XLPE submarine cable[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2634-2643.
[22] FABIANI D, MONTANARI G C, DISSADO L A, et al. Fast and slow charge packets in polymeric materials under DC stress[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009, 16(1): 241-250.
[23] 潘佳萍，张冶文，李俊，等. 结合电子束辐照与压电压力波法空间电荷分布实时测量的空间电荷包迁移行为的研究[J]. 物理学报，2024，73(2)：027701.
PAN Jiaping, ZHANG Yewen, LI Jun, et al. Migration behavior of space charge packet researched by using electron beam irradiation and real-time space charge distribution measurement in piezo-pressure wave propagation (PWP) method[J]. Acta Physica Sinica, 2024, 73(2): 027701.
[24] 周兴梅，蔡彪，彭庆军，等. 聚四氟乙烯空间电荷测量及温度特性分析[J]. 云南电力技术，2018，46(5)：109-113.
ZHOU Xingmei, CAI Biao, PENG Qingjun, et al. Analysis of space charge characteristics of polytetrafluoroethylene corresponding to various temperatures and measurement of space charge distribution based on PEA[J]. Yunnan Electric Power, 2018, 46(5): 109-113.
[25] 彭向阳，姚驰，余欣，等. 硅烷接枝聚丙烯的直流电性能与陷阱机制[J]. 高电压技术，2023，49(11)：4480-4489.
PENG Xiangyang, YAO Chi, YU Xin, et al. DC electrical properties and trap mechanism of silane-grafted polypropylene[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(11): 4480-4489.
[26] MATSUI K, TANAKA Y, TAKADA T, et al. Space charge behavior in low-density polyethylene at pre-breakdown[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(3): 406-415.
[27] LEWIS T J. Charge transport, charge injection and breakdown in polymeric insulators[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1990, 23(12): 1469-1478.
[28] 王威望，李盛涛. 工程固体电介质绝缘击穿研究现状及发展趋势[J]. 科学通报，2020，65(31)：3461-3474.
WANG Weiwang, LI Shengtao. Research status and development of insulation breakdown in engineering solid dielectrics[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(31): 3461-3474.



王冰洁
1998—，男，博士生
研究方向为电介质在高温下的电荷输运机理
E-mail: 18712663565@qq.com

WANG Bingjie
Ph.D. candidate



吴　锴(通信作者)
1969—，男，博士，教授，博导
从事绝缘材料电老化及击穿理论、局部放电检测及内在机理研究和城市能源系统的合理优化等方面的研究工作
E-mail: wukai@xjtu.edu.cn

WU Kai
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2025-04-25　在线出版日期　2025-08-26　　编辑　曹昭君