

不同飞行高度对 ETFE 航空用电缆 绝缘击穿性能的影响机理

李丽丽¹⁾ 李育哲¹⁾ 李晓坤²⁾ 付磊³⁾ 王玉龙^{1)†} 韩爽¹⁾ 高俊国¹⁾

1) (哈尔滨理工大学电气与电子工程学院, 高效能特种电缆技术全国重点实验室,
工程电介质及其应用教育部重点实验室, 哈尔滨 150080)

2) (沈飞线束科技有限公司, 沈阳 110035)

3) (中国航空工业集团公司沈阳飞机设计研究所, 沈阳 110035)

(2025 年 7 月 14 日收到; 2025 年 8 月 10 日收到修改稿)

通过分子动力学模拟研究乙烯-四氟乙烯共聚物 (ETFE) 在低气压下的击穿性能, 并通过低气压击穿实验对仿真结果进行验证, 从原子尺度揭示 ETFE 材料在低气压下绝缘失效机制. 首先, 对 ETFE 进行分子动力学模拟, 随着飞行高度从 0 km 逐渐增大到 24 km, 模拟气压从 101.300 kPa 逐渐降低到 2.951 kPa, ETFE 的分子间距离增大 9.692%, 链间相互作用能降低 8.383%, 自由体积分数增大 62.586%, 而密度下降 7.737%. 其次, 基于电机械击穿理论, 推导得到 ETFE 击穿场强降低 17.626%. 最后, 通过低气压击穿实验测得击穿场强下降 40.078%, 密度测试得到密度下降 1.574%. 仿真和实验结果均证明, ETFE 的击穿场强随着气压的下降而降低. 这是由于处于低气压条件时, 自由体积分数的增加与密度的降低均为自由电子提供更长的自由行程; 而电荷陷阱能级的下降导致介质对电荷的束缚能力下降, 使自由电子浓度增加. 以上因素的共同作用导致 ETFE 在不同飞行高度下的击穿场强下降, 为 ETFE 在航空航天、高飞行高度极端环境下的应用提供了性能预测与失效机理分析, 对航空绝缘 ETFE 材料的优化设计具有指导意义.

关键词: 乙烯-四氟乙烯共聚物, 低气压, 分子动力学, 击穿场强

PACS: 77.22.Jp, 77.65.-j, 52.80.Vp, 83.10.Mj

DOI: 10.7498/aps.74.20250932

CSTR: 32037.14.aps.74.20250932

1 引言

乙烯-四氟乙烯共聚物 (ETFE) 作为一种高性能氟塑料, 因质量轻, 密度小, 柔韧性好、化学稳定性好、耐温等级高以及绝缘性能优异等优点, 在许多高技术领域中得到了广泛应用, 尤其是在航空航天、化工设备、建筑以及太阳能光伏领域. 因此, 研究 ETFE 在不同气压下的电气和机械性能的演变机理, 能够为其在航空航天、电力设施及其他极端环境下的应用提供重要的理论支撑^[1,2].

目前, 在不同气压下 ETFE 电学性能的研究较少, Riba 等^[3] 测试了聚四氟乙烯 (PTFE) 和 ETFE 在 10—100 kPa 压力条件下的表面放电电阻, 结果表明 PTFE 绝缘在抗表面放电方面优于 ETFE. Shamsavarian 等^[4,5] 对航空系统中常用的高温绝缘材料 (FEP, ETFE 和 PEEK) 进行了低压下的电压斜坡测试, 结果表明随着气压降低, ETFE 的局部放电起始电压明显下降, 使得 ETFE 更易发生放电. Bas-Calopa 等^[6] 提出了一种在低压条件下测试电线并评估其性能的方法, 结果发现低气压条件会加剧材料的电树老化和局部放电行为. 目前已

† 通信作者. E-mail: wangyulong@hrbust.edu.cn

有关于低气压环境下 ETFE 的局部放电和电树老化、电压斜坡测试以及加速老化^[7]等相关研究,但低气压条件下 ETFE 的击穿性能未见报道.同时,气体在低气压下的击穿性能已经有可靠的研究结果,并得出巴申定律的理论,然而固体介质在低气压环境中击穿性能的研究报道较少,低气压下的击穿机理还有待继续探讨.

本文对 ETFE 进行变气压的分子动力学模拟,分析其击穿场强的变化,与此同时还进行了 ETFE 的低气压击穿实验和仿真协同探究低气压对 ETFE 击穿性能的影响,具体工作流程如图 1 所示.本工作为航空航天等领域绝缘材料的设计与应用提供理论依据.

2 聚合物模型构建

2.1 理论模型

对 ETFE 进行分子动力学模拟,首先需要建立聚合物模型.第一步构建 ETFE 的单体模型如图 2(a) 所示,即乙烯和四氟乙烯模型,然后使用扩展功能将单体扩建成链,如图 2(b) 所示.之后通过聚合功能,将分子链进行聚合形成 ETFE 模型^[8,9],聚合形成的模型如图 2(c) 所示.

对构建的 ETFE 模型进行几何优化,消除初始结构中明显的原子重叠或不合理构型.选择几何优化(geometry optimization)功能,使用 COMPASSIII

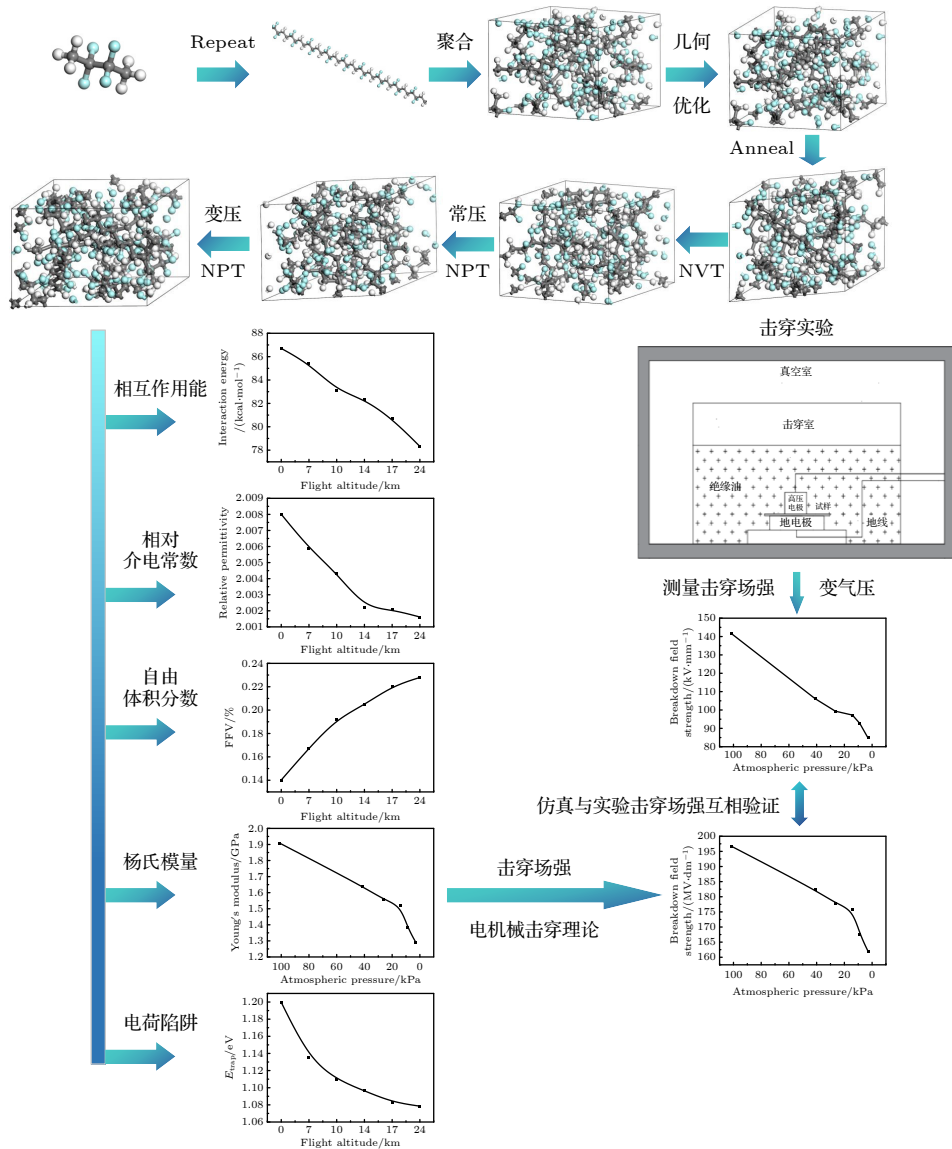


图 1 ETFE 不同飞行高度下的性能研究

Fig. 1. Performance study of ETFE at different flight altitudes.

力场^[10], 最大迭代次数设置为 20000 步. 而后, 对几何优化后的 ETFE 模型进行退火操作, 退火可以通过温度的升降循环, 帮助体系跳出局部能量最小值, 搜寻全局能量最低状态. 退火选择 Anneal 功能, 同样使用 COMPASSIII 力场^[11], 每个梯度的动力学步数为 2000 步.

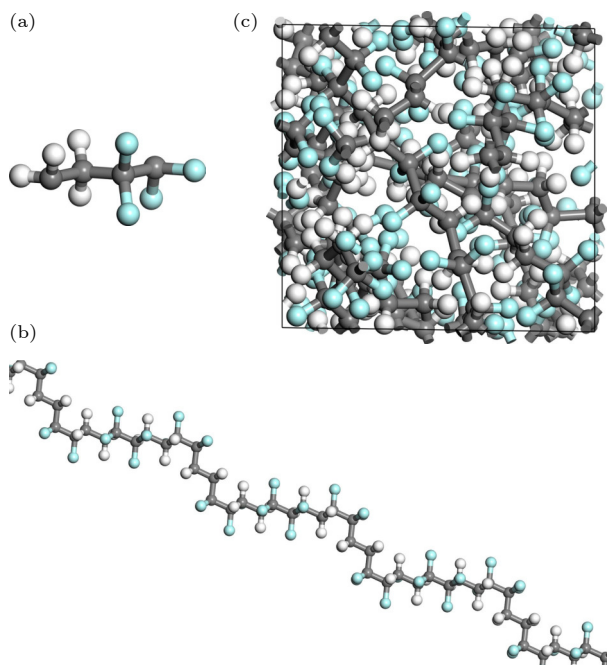


图 2 ETFE 模型 (a) ETFE 单体模型; (b) 分子链模型; (c) ETFE 聚合物模型

Fig. 2. ETFE model: (a) ETFE monomer model; (b) molecular chain model; (c) ETFE polymer model.

2.2 分子动力学模拟

对构建好的 ETFE 模型进行分子动力学模拟, 功能选择 Dynamics, 力场使用 COMPASSIII, 选择 NVT 系综, 对 ETFE 模型进行初步平衡, 温度设置为 298.150 K, 时间设置为 1500 ps, 确保系统能达到平衡状态. 而后, 对达到平衡态的模型再进行分子动力学模拟, 选择 NPT 系综, 压强设置为 101.300 kPa, 时间设置为 1500 ps. 最后, 对 NPT 系综下达到平衡状态的模型, 设置不同的气压值, 继续在 NPT 系综下进行分子动力学模拟, 气压参数的设置如表 1 所列, 其各飞行高度和气压值均根据 NASA 发布的高度和气压公式计算得到.

2.3 平衡状态分析

以飞行高度 0 km 为例, 分子动力学模拟得到的 ETFE 模型温度波动图、能量波动图和密度波

动图如图 3、图 4 和图 5 所示. 从图 3 可以看出, 体系温度始终在温度 298.150 K 上下波动. 与此同时, ETFE 体系动能 Kinetic energy 的变化率均小于 3.887%, 而密度 Density 的变化率均小于 3.334%, 如图 4 和图 5 所示. 为了更好地观察不同飞行高度下 ETFE 体系动能和密度的变化, 将其变化率汇总至表 2. 可以看出, ETFE 动能和密度的变化率都小于 5%. 基于此可判断 ETFE 的分子动力学模拟达到平衡状态. 不同气压下达到平衡的模型图如图 6 所示, 并且后续的研究工作均以平衡状态为基础进行.

表 1 不同飞行高度对应的气压值

Table 1. Barometric pressure values at different flight altitudes.

高度/km	气压值/kPa
0	101.300
7	41.150
10	26.520
14	14.190
17	8.857
24	2.951

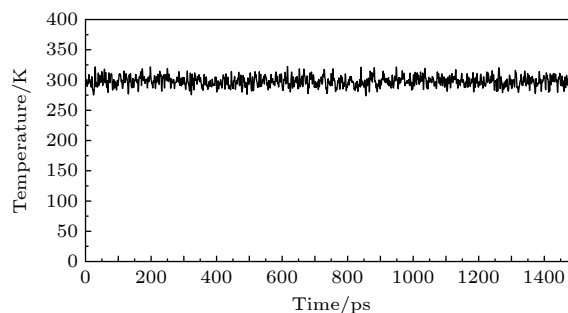


图 3 ETFE 分子动力学模拟的温度变化曲线

Fig. 3. Temperature variation curve of ETFE molecular dynamics simulation.

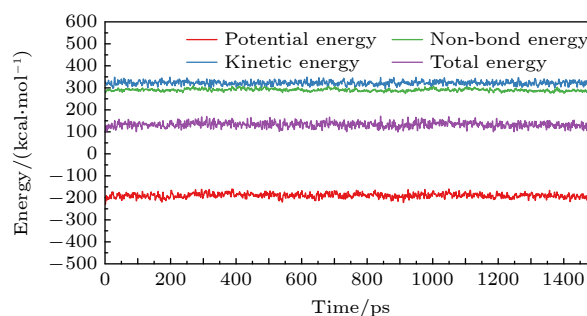


图 4 ETFE 分子动力学模拟的能量变化曲线

Fig. 4. Energy variation curves of ETFE molecular dynamics simulation.

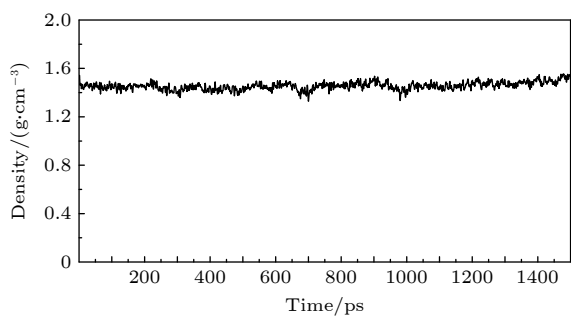


图 5 ETFE 分子动力学模拟的密度变化曲线

Fig. 5. Density variation curve of ETFE molecular dynamics simulation.

表 2 不同飞行高度下 ETFE 平衡状态的动能和密度的变化率

Table 2. Rate of change of kinetic energy and density of ETFE in equilibrium state under different flight altitudes.

飞行高度/km	动能变化率/%	密度变化率/%
0	3.887	3.334
7	4.623	4.054
10	3.448	4.111
14	3.030	4.225
17	3.311	4.286
24	3.367	3.497

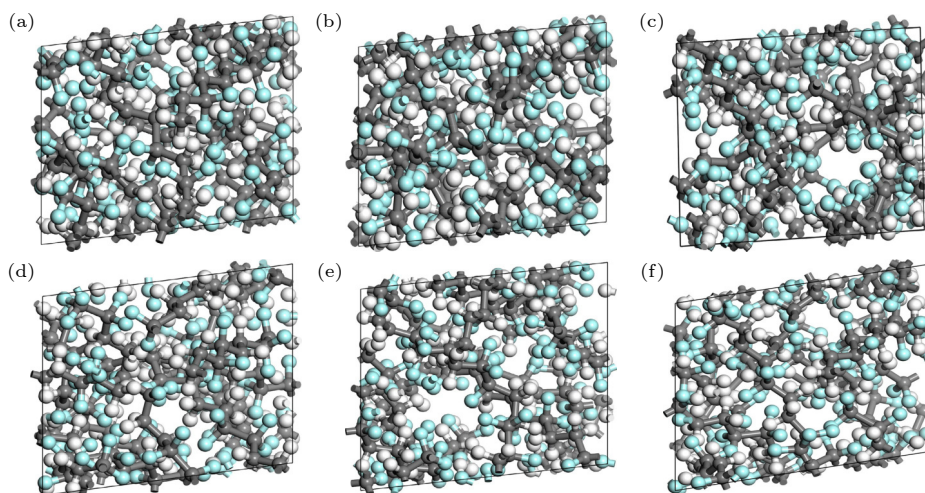


图 6 不同飞行高度下 ETFE 分子动力学模拟平衡状态模型 (a) 0 km; (b) 7 km; (c) 10 km; (d) 14 km; (e) 17 km; (f) 24 km

Fig. 6. Equilibrium state model of ETFE molecular dynamics simulation at different flight altitudes: (a) 0 km; (b) 7 km; (c) 10 km; (d) 14 km; (e) 17 km; (f) 24 km.

3 仿真结果与讨论

3.1 相互作用能分析

为了更好地分析 ETFE 的自由体积、杨氏模量等参数的变化, 特采用 ETFE 分子链间的相互作用能反映其相互作用强度^[12]. 因分子间相互作用能大小与分子间距离有关, 因此首先测量 ETFE 分子间距离.

通过 Forcite Analysis 模块下的 Radial Distribution Function 功能, 即径向分布函数 (RDF), 对分子链之间的距离进行测量, 具体操作步骤如下.

首先, 标记其中一条链上的 F 原子, 标记另一条分子链上的 H 原子, 如图 7 所示. 而后, 使用径向分布函数测量标记不同链上 H 原子与 F 原子之间的距离, 得到的 RDF 图, 如图 8 所示. 第 1 个 $g(r) > 1$ 峰值对应的是参考原子最近邻原子的分

布区域, 横坐标为标记的两原子间最小距离的统计平均值. 由于标记原子为两条分子链上的不同元素, 因此第 1 个 $g(r) > 1$ 峰值的横坐标即为分子链间距离. 不同飞行高度下 ETFE 分子链间的距离如表 3 所列.

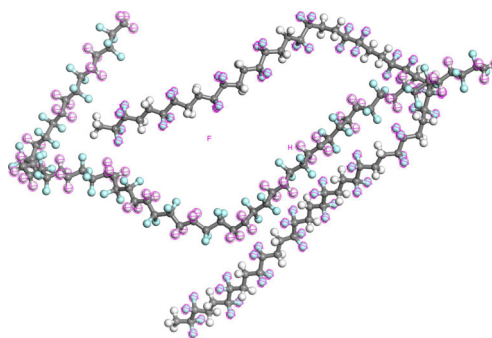


图 7 在 ETFE 中通过标记不同链 H 和 F 测量分子间距离

Fig. 7. Intermolecular distances are measured in ETFE by labeling different chains H and F.

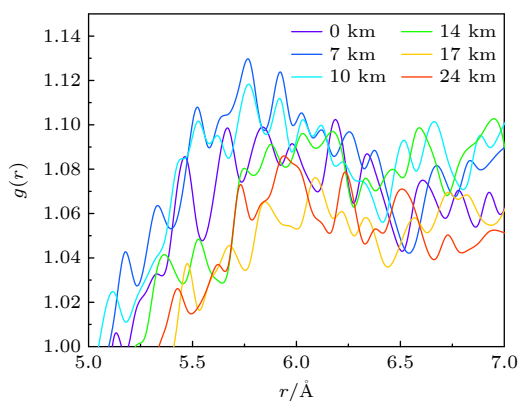


图 8 ETFE 分子间距离对应的 RDF 图

Fig. 8. RDF graph corresponding to intermolecular distance of ETFE.

表 3 不同飞行高度下 ETFE 分子间距离

Table 3. Intermolecular distance of ETFE at different flight altitudes.

飞行高度/km	分子间距离/Å
0	5.675
7	5.775
10	5.825
14	5.975
17	6.075
24	6.225

根据图 8 和表 3 可得, 随着飞行高度的升高, 分子间距离呈现逐渐增大的趋势. 飞行高度处于 0 km, 分子间距离为 5.675 Å. 当飞行高度升至 7 km, 分子间距离增大为 5.775 Å, 相比飞行高度 0 km 时增大了 1.762%. 继而, 飞行高度升至 10 km, 分子间距离增大为 5.825 Å, 相比飞行高度 0 km 时增大了 2.643%. 随后, 飞行高度升至 14 km, 分子间距离增大为 5.975 Å, 相比飞行高度 0 km 时增大了 5.286%. 接着, 飞行高度达到 17 km, 分子间距离增大为 6.075 Å, 相比飞行高度 0 km 时增大了 7.048%. 最后, 当飞行高度升至 24 km, 分子间距离增大到 6.225 Å, 相比飞行高度 0 km 时增大了 9.692%.

ETFE 分子间距离随着气压的降低而增大, 这主要是由于随着气压下降, ETFE 体系内压力降低, 从而使分子链热运动的阻碍作用减弱, 即分子链的热运动增强, 进而导致摆脱分子间相互作用力的能力变强, ETFE 体系内分子间距离增大.

由图 9 可知, 随着飞行高度的升高, 分子间相互作用能出现逐渐减小的变化趋势. 当飞行高度处于 0 km, ETFE 分子的相互作用能为 86.704 kcal/mol.

当飞行高度升至 7 km, 相互作用能降为 85.384 kcal/mol, 相比飞行高度 0 km 时相互作用能减小了 1.522%. 随后, 飞行高度升至 10 km, 相互作用能进一步降低至 83.133 kcal/mol, 相比飞行高度 0 km 时相互作用能减小了 4.119%. 而后, 当飞行高度达到 14 km, 相互作用能降为 82.347 kcal/mol, 相比飞行高度 0 km 时相互作用能减小了 5.025%. 接着, 飞行高度升至 17 km, 相互作用能降至 80.680 kcal/mol, 相比飞行高度 0 km 时相互作用能减小了 6.948%. 最后, 当飞行高度达到 24 km, 相互作用能降为 78.321 kcal/mol, 相比飞行高度 0 km 时相互作用能减小了 8.383%.

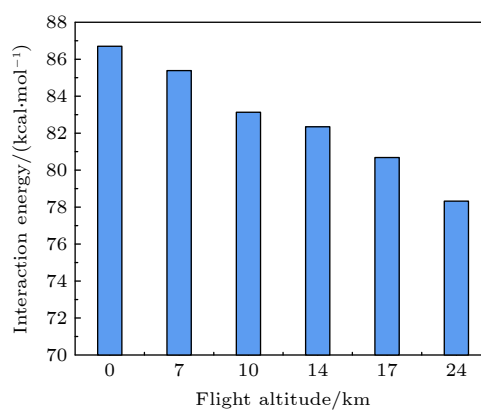


图 9 ETFE 的分子间相互作用能随飞行高度的变化

Fig. 9. Variation of intermolecular interaction energy of ETFE with flight altitude.

这种变化可以通过 ETFE 范德瓦耳斯力的变化来解释. ETFE 的分子间相互作用力主要是范德瓦耳斯力, 而范德瓦耳斯力包括取向力、诱导力和色散力. 取向力是极性分子与极性分子之间的永久偶极矩相互作用, 诱导力是极性分子的永久偶极矩诱导非极性分子产生诱导偶极后两者之间的相互作用力, 色散力是所有分子间由瞬时偶极矩相互作用产生的力^[13], 是范德瓦耳斯力中最普遍的形式. ETFE 的范德瓦耳斯力主要是由瞬时偶极矩相互作用产生的色散力, 势能公式^[14]:

$$U = -\frac{3}{4} \frac{\alpha^2 I}{(4\pi\epsilon_0)^2 r^6}, \quad (1)$$

其中, I 为分子的电离能, α 为极化率, r 为瞬时偶极矩之间的距离.

根据图 10 相对介电常数随飞行高度的变化图可以得到, ETFE 作为非极性分子, 气压对极化率的影响很小. 根据表 3 可以看出分子链之间距离

随着气压的降低而增大, 而色散力与距离的六次方成反比, 导致范德瓦耳斯力随着气压的降低而降低, 分子间相互作用能的大小也随着气压的降低而降低.

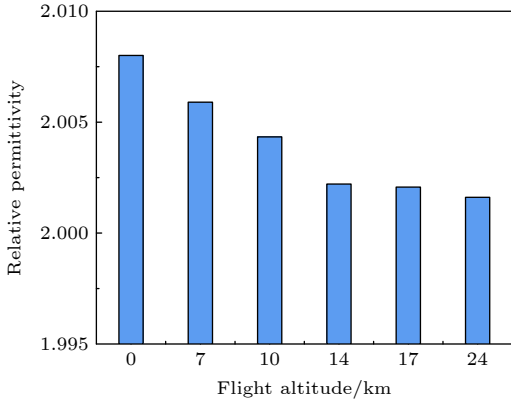


图 10 ETFE 的相对介电常数随飞行高度的变化
Fig. 10. Variation of the relative dielectric constant of ETFE with flight altitude.

3.2 自由体积分数分析

ETFE 的性能与非晶区的自由体积密切相关, 自由体积是指材料中未被分子链或原子占据的空隙体积, 自由体积分数是材料的自由体积占总体积的比例. 模拟 ETFE 分子链的堆积形态, 计算自由体积分数, 通过自由体积分数的变化, 可以预测聚合物的结构、力学、电学性能变化. 自由体积分数的求取公式如下^[15,16]:

$$f = \frac{V_{\text{free}}}{V_{\text{total}}}, \quad (2)$$

其中 V_{free} 为自由体积, 总体积 V_{total} 为自由体积与分子链占据的体积相加.

由图 11 可得, 随着飞行高度的升高, 自由体积分数呈现逐渐增大的趋势. 飞行高度处于 0 km, 自由体积分数为 14.019%. 当飞行高度升至 7 km, 自由体积分数增大为 16.749%, 相比飞行高度 0 km 时增大了 19.474%. 继而, 飞行高度升至 10 km, 自由体积分数增大为 19.255%, 相比飞行高度 0 km 时增大了 27.193%. 随后, 飞行高度升至 14 km, 自由体积分数增大为 20.451%, 相比飞行高度 0 km 时增大了 45.881%. 接着, 飞行高度达到 17 km, 自由体积分数增大为 22.046%, 相比飞行高度 0 km 时增大了 57.258%. 最后, 当飞行高度升至 24 km, 自由体积分数增大到 22.793%, 相比飞行高度 0 km 时增大了 62.586%.

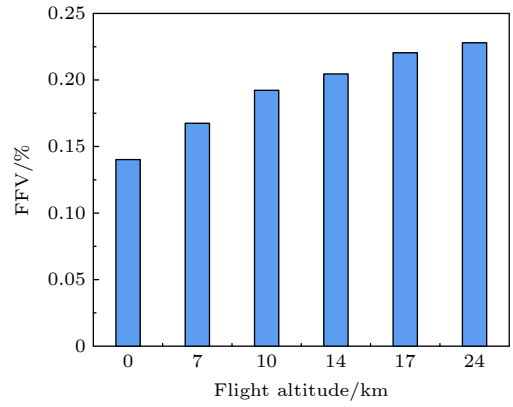


图 11 ETFE 的自由体积分数随飞行高度的变化
Fig. 11. Variation of the free volume fraction of ETFE with flight altitude.

自由体积分数随着气压的降低而逐渐增大, 可能是由于以下原因. 首先, 气压降低时, 分子间距离增大, 分子链之间的空隙随之增大, 自由体积也变大. 共价键的键长几乎没有变化^[17], 分子链占据的体积也几乎不变, 而自由体积变大, 因此自由体积所占的比例增大, 即自由体积分数增大^[18]. 其次, 根据图 12 仿真得到的自由体积切面图可以看出, 随着气压的降低, 蓝色区域的自由体积变大, 且在整个模型中所占的比例也增大, 即自由体积分数逐渐增大.

与此同时, 低气压下 ETFE 体系自由体积分数降低会导致聚合物的密度下降, 如图 13 所示. 这主要是由于气压的下降使分子间距离和自由体积增大, 从而使介质在体积相同下的分子数明显减少, 质量亦随之降低, 而密度为质量和体积之比, 因此, ETFE 体系的密度随着气压降低而减小.

3.3 电荷陷阱分析

电荷陷阱是介质因结构缺陷、杂质等引起的可捕获载流子(如电子或空穴)的局域化能态, 而电荷陷阱能级是指载流子被捕获或释放所需克服的势垒能量. 因此, 本研究采用电荷陷阱能级分析 ETFE 的电导率、击穿强度等性能.

参考李亚莎等^[19,20]利用聚合物模型计算电荷陷阱能级的方法, 模拟分析了不同高度下 ETFE 体系的电荷陷阱能级. 在计算电荷陷阱能级时, 选用 DMol3 模块的 energy 功能. 为确保结果的准确性与可靠性, 需保持诸多条件的一致性, 即维持完全相同的几何结构、采用相同的泛函、遵循相同的收敛标准. 在此基础上, 对中性态和含有一个

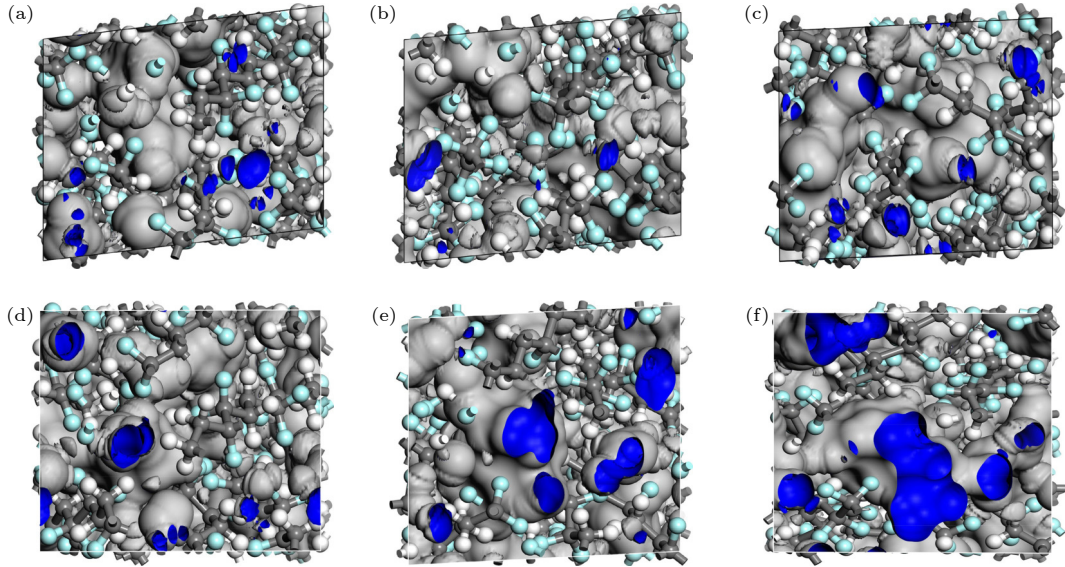


图 12 不同飞行高度下 ETFE 模型的自由体积变化 (a) 飞行高度 0 km; (b) 飞行高度 7 km; (c) 飞行高度 10 km; (d) 飞行高度 14 km; (e) 飞行高度 17 km; (f) 飞行高度 24 km

Fig. 12. Variation of free volume of ETFE model at different flight altitudes: (a) 0 km; (b) 7 km; (c) 10 km; (d) 14 km; (e) 17 km; (f) 24 km.

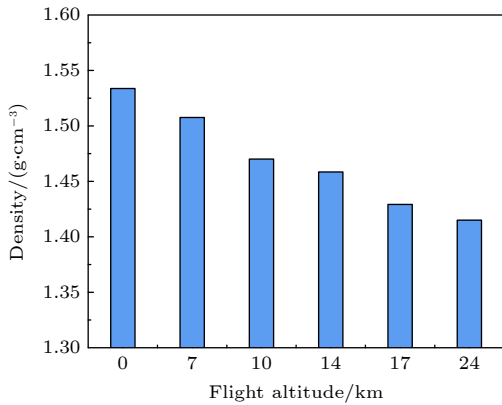


图 13 ETFE 的密度随飞行高度的变化

Fig. 13. Variation of the density of ETFE with flight altitude.

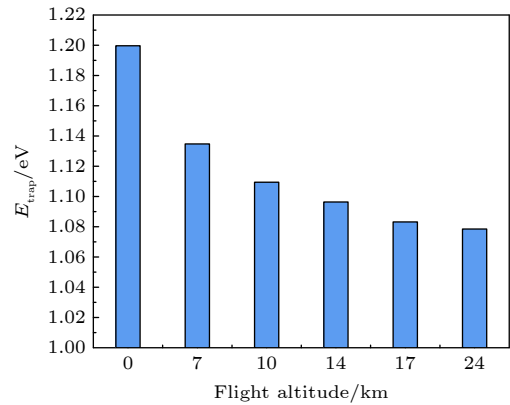


图 14 ETFE 的电荷陷阱能级随飞行高度的变化

Fig. 14. Variation of the charge trap energy level of ETFE with flight altitude.

电子的阴离子态, 分别进行单点能量计算. ETFE 体系中中性态和阴离子态的能量差即为电荷陷阱能级^[21-23]. 不同飞行高度下 ETFE 体系的电荷陷阱能级变化如图 14 所示.

由图 14 可知, 随着飞行高度的升高, 电荷陷阱能级呈现逐渐减小的趋势. 飞行高度处于 0 km, 电荷陷阱能级为 1.200 eV. 当飞行高度升到 7 km, 电荷陷阱能级降为 1.135 eV, 相比飞行高度 0 km 时减小了 5.417%. 继而, 飞行高度升至 10 km, 电荷陷阱能级降为 1.109 eV, 相比飞行高度 0 km 时减小了 7.583%. 随后, 飞行高度升至 14 km, 电荷陷阱能级减小为 1.096 eV, 相比飞行高度 0 km 时

减小了 8.667%. 接着, 飞行高度升至 17 km, 电荷陷阱能级降为 1.083 eV, 相比飞行高度 0 km 时减小了 9.750%. 最后, 当飞行高度达到 24 km, 电荷陷阱能级减小至 1.079 eV. 电相比飞行高度 0 km 时减小了 10.083%.

ETFE 的电荷陷阱能级随着气压的降低而降低, 可借助库仑势阱模型对此现象进行解释说明^[24,25]. 两电荷 Q_1 和 Q_2 与陷阱捕获电荷 q 在陷阱位置处的总电势能 E_p 为^[26]

$$E_p = \frac{Q_1 q}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r r_1} + \frac{Q_2 q}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r r_2}, \quad (3)$$

其中 Q_1 和 Q_2 为两种原子的电荷, ϵ_0 为真空介电

常数, ϵ_r 为材料相对介电常数, r_1 和 r_2 为缺陷与两原子间的距离. 由图 10 可得, 介质相对介电常数随气压变化很小, 因此陷阱势能主要受 r_1 和 r_2 的影响.

基于以上分析可知, 首先, 当气压降低时, ETFE 分子链间距离增大, 使两原子的距离 r_1 和 r_2 亦随之增加. 根据 (3) 式可得, 当距离 r_1 和 r_2 增大时, 陷阱的总电势能 E_p 减小, 进而使 ETFE 体系内电荷陷阱能级降低. 其次, 随着气压下降, ETFE 分子间距离和自由体积分数增大, 这无形中减少了单位体积内原子数目, 从而使电荷量随着原子数目减少而降低, 整体表现为 ETFE 体系内电荷陷阱能级随着气压下降而降低 [27].

3.4 击穿场强分析

为分析气压对 ETFE 体系力学性能的影响, 并利用电-机械击穿理论计算击穿场强, 特对 ETFE 体系的杨氏模量进行了模拟. 杨氏模量是衡量材料在弹性变形阶段抗拉或抗压刚度的基本力学参数, 其定义为线性弹性区域内应力与应变之比. 杨氏模量越大, 则材料越硬, 越难变形 [28].

计算杨氏模量使用 Forcite 模块, 选用 Mechanical Properties 功能, 实现材料的机械性能模拟. 该模块通过施加微小可控应变, 驱动体系在弹性变形阶段产生应力响应, 基于连续介质力学的广义胡克定律, 从应力-应变的线性关系中拟合提取 Lamé 常数 λ (关联体积变形阻力) 和 μ (关联剪切变形阻力), 最终利用各向同性弹性体的模量换算关系计算得到杨氏模量 Y . 具体计算公式如下 [29]:

$$Y = \mu \left(\frac{3\lambda + 2\mu}{\lambda + \mu} \right). \quad (4)$$

图 15 为模拟得到的杨氏模量随气压的变化. 随着气压降低, 杨氏模量亦逐渐下降, 说明 ETFE 在单向拉伸或压缩时抵抗形变的能力变弱.

由图 15 可知, 随着飞行高度升高, 杨氏模量呈现逐渐减小的趋势, 产生这种现象的原因如下. 首先, 气压降低时, ETFE 分子间相互作用力变小, 导致分子链抵抗形变能力下降 [30,31], 从而使 ETFE 的杨氏模量下降. 其次, 随着气压降低, ETFE 的分子间距离和自由体积分数逐渐增大, 导致单位体积内分子数减少. 当 ETFE 体系受到相同的外力时, 单位体积内分子链承受的外力增强, 分子链更容易发生弹性移动, 整体表现为介质的杨氏模量下

降. 最后, 分子间距离和自由体积分数增大, 使分子链受到外力作用时, 发生滑移的空间增加 [32-34], 同样导致 ETFE 体系的杨氏模量下降.

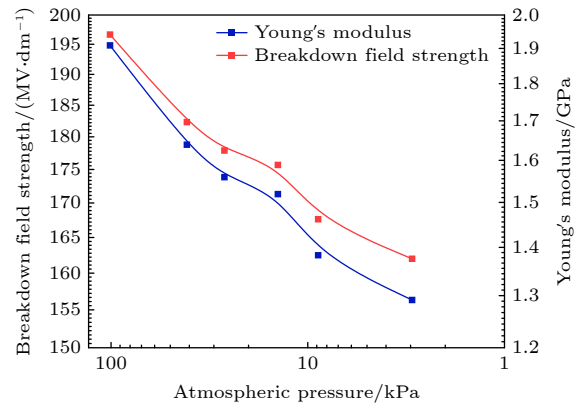


图 15 不同气压下 ETFE 的击穿场强和杨氏模量
Fig. 15. Breakdown field strength and Young's modulus of ETFE at different air pressures.

随后, 根据盖同提出的电-机械击穿理论, 可利用杨氏模量计算得到 ETFE 体系的击穿场强. 当电压作用于介质时, 正、负电极间的静电吸引力表现为对电极间介质材料的挤压力, 挤压力使介质厚度减薄. 当电压不变, 电场强度增大, 挤压作用力变强, 介质最后同时失去机械强度和电强度而击穿. 根据电-机械击穿理论, 击穿场强的计算公式如下 [35]:

$$E = 0.6 \left(\frac{Y}{\epsilon_0 \epsilon_r} \right)^{1/2}, \quad (5)$$

其中 ϵ_0 为真空介电常数, ϵ_r 为材料相对介电常数.

由图 15 可知, 随着飞行高度升高, 击穿场强呈现逐渐减小的趋势. 飞行高度处于 0 km, 击穿场强为 196.661 MV/dm. 当飞行高度为 7 km, 击穿场强减小到 182.314 MV/dm, 相比飞行高度 0 km 时减小了 7.295%. 继而, 当飞行高度升为 10 km, 击穿场强降为 177.894 MV/dm, 相比飞行高度 0 km 时减小了 9.543%. 随后, 飞行高度升至 14 km, 击穿场强降为 175.699 MV/dm, 相比飞行高度 0 km 时减小了 10.659%. 接着, 飞行高度升至 17 km, 击穿场强减小为 167.639 MV/dm, 相比飞行高度 0 km 时减小了 14.757%. 最后, 飞行高度达到 24 km, 击穿场强降低至 161.997 MV/dm. 相比飞行高度 0 km 时减小了 17.626%.

ETFE 体系击穿场强随飞行高度增加而下降, 可能是由自由体积分数增加、杨氏模量降低和电荷

陷阱能级下降的综合作用导致的. 自由体积分数和电荷陷阱能级主要通过自由电子的自由行程影响介质的击穿场强, 而杨氏模量则通过正负电极间距离改变场强进而影响 ETFE 体系的击穿场强.

4 击穿实验验证

为了更好地验证气压对 ETFE 绝缘性能的影响, 本文特对不同气压条件下 ETFE 的击穿性能进行测试. 目前, 常温下介质的击穿实验装置较为成熟^[36], 进行变气压击穿实验过程中, 为了更方便地控制气压, 需将击穿装置和真空箱组合, 形成变气压击穿实验装置, 如图 16 所示. 值得注意的是, 在变气压击穿实验过程中, 为了保持气压环境的稳定性, 须将真空箱气压设置为表 1 所列的气压条件, 并保持目标气压值 20 min 后, 方可进行击穿实验.

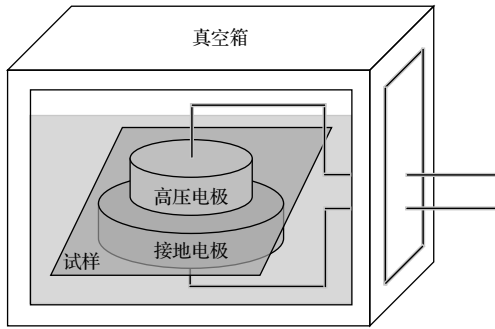


图 16 变气压击穿实验装置接线图

Fig. 16. Wiring diagram of the variable pressure breakdown experimental setup.

变气压击穿实验得到的击穿场强见图 17. 随着飞行高度的升高, 击穿场强呈现逐渐减小的趋势. 飞行高度处于 0 km, 击穿场强为 141.500 kV/mm. 当飞行高度升至 7 km, 击穿场强降为 106.200 kV/mm, 相比飞行高度 0 km 时减小了 24.947%. 继而, 当飞行高度升至 10 km, 击穿场强降为 99.370 kV/mm, 相比飞行高度 0 km 时减小了 29.774%. 随后, 当飞行高度达到 14 km, 击穿场强减小到 97.230 kV/mm, 相比飞行高度 0 km 时减小了 31.286%. 接着, 当飞行高度升至 17 km, 击穿场强降为 92.670 kV/mm, 相比飞行高度 0 km 时减小了 34.509%. 最后, 飞行高度达到 24 km, 击穿场强降低至 84.790 kV/mm. 相比飞行高度 0 km 时减小了 40.078%.

经对比发现, 随着飞行高度增加, ETFE 体系击穿场强的模拟值和实验数据在量值上存在一定

的差异性, 其可能原因如下: 一方面, 模拟的击穿场强是根据电-机械击穿理论计算得到的. 在电-机械击穿理论中, 假设材料是完全均匀、各向同性且没有缺陷的理想弹性体, 而实际 ETFE 不可避免地存在杂质、气泡、微孔、表面划痕、厚度不均以及结晶区与非晶区等微观尺度的缺陷和不均匀性, 这些均会降低 ETFE 介质的击穿场强. 另一方面, 电-机械击穿理论假设击穿均由电场力造成的机械拉伸失稳 (电致伸缩应力超过材料的拉伸强度) 导致, 而在实际击穿过程中, 往往伴随着更为复杂的物理化学过程^[37-39], 如电子注入与倍增、碰撞电离、空间电荷效应、局部发热与热击穿等. 从而使 ETFE 理论计算的击穿场强和实验测试击穿场强在数值上存在一定的差异性.

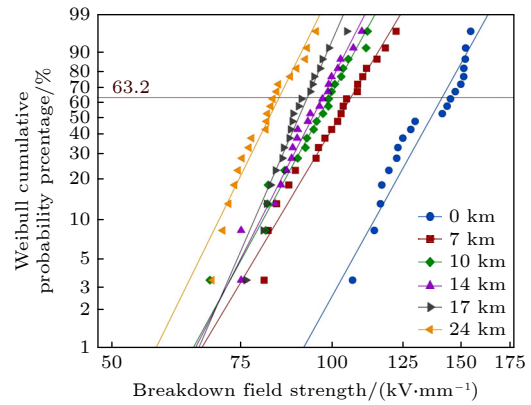


图 17 不同飞行高度下 ETFE 击穿场强的 Weibull 累积概率分布

Fig. 17. Weibull cumulative probability distribution of ETFE breakdown field strength at different flight altitudes.

与此同时, 无论是理论计算, 还是实验测试得到的 ETFE 击穿场强, 随着飞行高度升高, ETFE 击穿场强均随着气压下降呈现降低的变化趋势, 分析可能原因如下. 首先, 自由体积分数和密度的变化. 当 ETFE 受到相同电压作用时, 低气压条件下介质内自由体积更大且密度更小 (表 4), 此时, 电子在两次碰撞间所走过的路程即电子的自由行程更大, 电子因电场力作用获得的动能增强, 与分子链碰撞时越容易发生碰撞电离^[40], 从而使 ETFE 击穿场强随着气压下降而出现降低的变化趋势.

另外, 电荷陷阱能级的变化. 在外施电场作用下, 载流子迁移率受陷阱的捕获与释放过程支配. 深陷阱增加了自由载流子的被捕获概率, 而减弱其释放概率, 此时介质电流密度增长较为缓慢, 使其击穿场强增大. 并且, 当深陷阱捕获高能电子后,

高能电子能量以热能的形式耗散,抑制了碰撞电离的链式反应,同样减弱了电流密度的增长速率,增加介质的击穿场强.因此,当 ETFE 的电荷陷阱能级随着气压降低而减小时,变浅的电荷陷阱对自由载流子的捕获概率降低,而释放概率增加,此时,介质内的载流子迁移率增加,介质内电流密度快速增大,从而使 ETFE 的击穿场强减小.与此同时,浅陷阱能级主要捕获低能电子,陷阱对碰撞电离链式反应的抑制作用减弱,亦使介质的击穿场强下降^[41,42].

表 4 不同飞行高度下 ETFE 的密度变化
Table 4. ETFE density measurement test at different flight altitudes.

高度/km	密度/(g·cm ⁻³)
0	1.715
7	1.703
10	1.707
14	1.703
17	1.692
24	1.688

最后,杨氏模量的变化.随着气压降低,ETFE 杨氏模量逐渐下降.当 ETFE 介质受到外施电压作用时,正、负电极间产生麦克斯韦应力.电介质表面单位面积受的麦克斯韦应力公式如下:

$$f = \frac{1}{2} \varepsilon \varepsilon_0 E^2, \quad (6)$$

其中 ε 为固体介质的介电常数, ε_0 为真空介电常数, E 为电极间平均场强.由 (6) 式可得,麦克斯韦应力与电极间场强的 2 次方成正比,而电极间场强与所施加的电压和电极间距离有关.当初始厚度相同时,因气压降低导致杨氏模量减小,使压缩形变增加,电极间距离减小,从而增加了电极间的电场强度,进而产生更大的变形应力,直至变形应力与麦克斯韦应力达到平衡为止.也就是说,当电极两端施加的电压相同时,杨氏模量越小,介质越容易发生击穿^[43].因此,随着气压下降,介质的杨氏模量降低,ETFE 的击穿场强亦出现逐渐下降的变化趋势.

5 结 论

本文利用分子动力学,模拟 ETFE 的自由体积分数、电荷陷阱能级、杨氏模量、击穿场强等参数,探讨气压条件对 ETFE 结构、力学和电学性能的

影响.同时对 ETFE 的击穿场强进行实验测试,与仿真结果相互验证,并利用自由体积击穿理论、电-机械击穿理论,分析气压对击穿场强的影响机理.

1) 随着气压下降,ETFE 体系的相互作用能、电荷陷阱和杨氏模量逐渐下降,而自由体积分数逐渐增大.当气压为 2.951 kPa 时 ETFE 体系的相互作用能与常压相比降低了 8.383%,电荷陷阱减小了 10.083%,杨氏模量下降了 32.362%,而自由体积分数增大了 62.586%.

2) 根据电-机械击穿理论,利用杨氏模量计算得到 ETFE 的击穿场强.击穿场强随气压下降而减小,由常压下的 196.661 MV/dm,减小到气压为 2.951 kPa 时的 161.997 MV/dm,降低了 17.626%.

3) 通过搭建变气压击穿实验平台,实验测试不同气压下 ETFE 的击穿场强.ETFE 的击穿场强随气压下降而逐渐减小,由常压下的 141.500 kV/mm,减小至气压为 2.951 kPa 时的 84.790 kV/mm,下降了 40.078%,气压对 ETFE 介质击穿场强的影响显著.

4) 理论计算与实验测试的击穿场强结果相互验证.气压越低,ETFE 的击穿场强越低.气压降低,ETFE 内自由体积增大、密度减小,均为载流子提供更长的自由行程;而电荷陷阱能级变浅使捕获的自由载流子减少,以上因素的协同作用使 ETFE 在低气压条件下的击穿场强下降.

参考文献

- [1] Yuan L J, Zheng X, Zhu W B, Wang B, Chen Y Y, Xing Y Q 2024 *Polymers* **16** 316
- [2] Ahmad J, Niasar M J 2025 *J. Appl. Polym. Sci.* **142** 27
- [3] Riba J R, Moreno-Eguilaz M, Ibrayemov T, Boizieu M 2022 *Materials* **15** 1677
- [4] Shahsavarian T, Li C, Baferani M A, Ronzello J, Cao Y, Wu X, Zhang D 2021 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **28** 231
- [5] Shahsavarian T, Li C, Baferani M A, Cao Y 2020 *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena East Rutherford, USA, October 18–30, 2020* p271
- [6] Bas-Calopa P, Riba J R, Moreno-Eguilaz M 2024 *Proc. IEEE Int. Instrum. Meas. Technol. Conf. Glasgow, United Kingdom, May 20–23, 2024* p1
- [7] Anoy S, Mona G 2024 *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.* **13** 4521
- [8] Al Otmi M, Willmore F, Sampath J 2023 *Macromolecules* **56** 9042
- [9] Guo G, Zhang J, Chen X, Zhao X, Deng J, Zhang G 2022 *Comput. Mater. Sci.* **212** 111571
- [10] Tamir E, Sidess A, Srebnik S 2019 *Chem. Eng. Sci.* **205** 332
- [11] Li L L, Han S, Wang Y L, Liu T J, Li Y Z, Gao J G 2025 *Acta Phys. Sin.* **74** 127702 (in Chinese) [李丽丽, 韩爽, 王玉龙,

- 刘统江, 李育哲, 高俊国 2025 物理学报 **74** 127702]
- [12] Wang J M, Cieplak P, Li J, Wang J, Cai Q, Hsieh M, Lei H X, Luo R, Duan Y 2011 *J. Phys. Chem. B* **115** 3100
- [13] von Milczewski J, Tolsma J R 2021 *Phys. Rev. B* **104** 125111
- [14] Israelachvili J N 2011 *Intermolecular and surface forces (Academic Press)* p108
- [15] Mazo M, Balabaev N, Alentiev A, Yampolskii Y 2018 *Macromolecules* **51** 1398
- [16] Sharma S K, Pujari P K 2017 *Prog. Polym. Sci.* **75** 31
- [17] Wong C P J, Choi P 2024 *Phys. Fluids* **36** 033120
- [18] Pacult J, Rams-Baron M, Chrzyszcz B, Jachowicz R, Paluch M 2018 *Mol. Pharm.* **15** 2807
- [19] Li Y S, Xia Y, Liu S C, Qu C 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 052101 (in Chinese) [李亚莎, 夏宇, 刘世冲, 瞿聪 2022 物理学报 **71** 052101]
- [20] Song X F, Min D M, Gao Z W, Wang P X, Hao Y T, Gao J H, Zhong L S 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 027301 (in Chinese) [宋小凡, 闵道敏, 高梓巍, 王泊心, 郝予涛, 高景晖, 钟力生 2024 物理学报 **73** 027301]
- [21] Tang X X, Ding C L, Yu S Q, Zhong C, Luo H, Chen S 2024 *Small* **20** 2306034
- [22] Konstantinou K, Elliott S R 2023 *Phys. Status Solidi RRL* **17** 8
- [23] Welwang W, Takada T, Tanaka Y, Li S T 2017 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **24** 3144
- [24] He G H, Luo H, Yan C F, Wan Y T, Wu D, Luo H, Liu Y, Chen S 2024 *Energy Environ. Mater.* **7** e12577
- [25] Yang K R, Chen W J, Zhao Y S, He Y, Chen X, Du B, Yang W, Song Z, Fu Y F 2021 *ACS Appl. Mater. Interfaces.* **13** 25850
- [26] Hayt W H (translated by Zhao Y Z) 2013 *Engineering Electromagnetics* (Xi'an Jiaotong University Press) p63 (in Chinese) [威廉 H. 哈伊特 著 (赵彦珍 译) 2013 工程电磁场 (西安交通大学出版社) 第 63 页]
- [27] Feng Y, Zhang S, Zhou B, Liu P Y, Yang X R, Li S T 2025 *Acta Phys. Sin.* **74** 087701 (in Chinese) [冯阳, 张硕, 周彬, 刘培焱, 杨心如, 李盛涛 2025 物理学报 **74** 087701]
- [28] Paleti S H K, Kim Y, Kimpel J, Craighero M, Haraguchi S, Müller C 2024 *Chem. Soc. Rev.* **53** 1702
- [29] Xu Z L 2006 *Theory of Elasticity* (Beijing: Higher Education Press) (in Chinese) [徐芝纶 2006 弹性力学 (北京: 高等教育出版社)]
- [30] Deng F K, Wei J H, Xu Y D, Lin Z Q, Lü X, Wan Y J, Sun R, Wong C P, Hu Y 2023 *Nano-Micro Lett.* **15** 106
- [31] Yu J X, Liang H L, Yang Y J, Ming X 2025 *Acta Phys. Sin.* **74** 077102 (in Chinese) [虞健祥, 梁华琳, 杨铁钧, 明星 2025 物理学报 **74** 077102]
- [32] Wei Z Z 2025 *Acta Phys. Sin.* **74** 036201 (in Chinese) [韦昭召 2025 物理学报 **74** 036201]
- [33] Hill A J, Thornton A W, Hannink R H J, Moon J D, Freeman B D 2020 *Corros. Eng. Sci. Technol.* **55** 145
- [34] Cao Y Y, Cao W H, Yang X, Liu C X, Qi X W 2021 *Polym. Adv. Technol.* **33** 146
- [35] Chen J D, Liu Z Y 1982 *Physics of Dielectrics* (Beijing: China Machine Press) p312 (in Chinese) [陈季丹, 刘子玉 1982 电介质物理学 (北京: 机械工业出版社) 第 312 页]
- [36] Stark S 2022 *J. Eur. Ceram. Soc.* **42** 462
- [37] Xing Z L, Gu Z L, Zhang C, Guo S W, Cui H Z, Lei Q Q, Li G C 2022 *Energies* **15** 4412
- [38] Kantar E, Eie-Klusmeier K K, Ve T A, Ese M H, Hvidsten S 2024 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **32** 416
- [39] Sima W, Yin Z, Sun P T, Li L C, Shao Q Q, Yuan T, Yang M 2020 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **27** 2014
- [40] Fica-Contreras S M, Li Z, Alamri A, Charnay A P, Pan J, Wu C, Lockwood J R, Yassin O, Shukla S, Sotzing G A, Cao Y, Fayer M D 2023 *Mater. Today.* **67** 57
- [41] Zhang M R, Zhu B F, Zhang X, Liu Z X, Wei X Y, Zhang Z C 2023 *Mater. Horiz.* **10** 2455
- [42] Min D M, Yan C Y, Mi R, Cui H Z, Li Y W, Wang W W, Fréchet M F, Li S T 2018 *IEEE Nanotechnol. Mag.* **12** 15
- [43] Wang J, Shen Z H, Liu R L, Shen Y, Chen L Q, Liu H X, Chen N W 2023 *Adv. Sci.* **10** 2300320

Mechanism of influence of different flight altitudes on insulation breakdown performance of ETFE aviation cables

LI Lili¹⁾ LI Yuzhe¹⁾ LI Xiaokun²⁾ FU Lei³⁾ WANG Yulong^{1)†}
HAN Shuang¹⁾ GAO Junguo¹⁾

1) (*Key Laboratory of Engineering Dielectrics and its Applications, Ministry of Education, State Key Laboratory of High-Efficiency Special Cable Technology, College of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China*)

2) (*Shenfei Wire Harness Technology Co., Ltd., Shenyang 110035, China*)

3) (*Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Ltd., Shenyang 110035, China*)

(Received 14 July 2025; revised manuscript received 10 August 2025)

Abstract

By studying the breakdown performance of ethylene-tetrafluoroethylene (ETFE) copolymer under low pressure via molecular dynamics simulations, and verifying the simulation results through low-pressure breakdown experiments, the insulation failure mechanism of ETFE materials under low pressure can be revealed on an atomic scale. First, molecular dynamics simulations are performed on ETFE. As the flight altitude gradually increases from 0 km to 24 km, the simulated pressure decreases from 101.300 kPa to 2.951 kPa. Correspondingly, the intermolecular distance increases by 9.692%, the interchain interaction energy decreases by 8.383%, the free volume fraction of ETFE increases by 62.586%, and the density of ETFE decreases by 7.737%. Subsequently, based on the electromechanical breakdown theory, it is deduced that the breakdown field strength of ETFE decreases by 17.626%. Finally, the low-pressure breakdown experiment shows that the breakdown field strength decreases by 40.078%, and the density measurement test indicates that the density decreases by 1.574%. Both simulation and experimental results confirm that the breakdown field strength of ETFE decreases with the reduction of pressure. This is because under low-pressure conditions, the increase in free volume fraction and the decrease in density provide a longer mean free path for free electrons. And the decrease in charge trap level weakens the charge trapping capability, leading to a higher concentration of free electrons. All these factors contribute to the reduction of the breakdown field strength of ETFE. This study provides performance prediction and failure mechanism analysis for the application of ETFE in aerospace and high-altitude extreme environments, and has guiding significance for the optimal design of aerospace insulation ETFE materials.

Keywords: ethylene-tetrafluoroethylene, low atmospheric pressure, molecular dynamics, breakdown field strength

PACS: 77.22.Jp, 77.65.-j, 52.80.Vp, 83.10.Mj

DOI: [10.7498/aps.74.20250932](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250932)

CSTR: [32037.14.aps.74.20250932](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20250932)

† Corresponding author. E-mail: wangyulong@hrbust.edu.cn

不同飞行高度对ETFE航空用电缆绝缘击穿性能的影响机理

李丽丽 李育哲 李晓坤 付磊 王玉龙 韩爽 高俊国

Mechanism of influence of different flight altitudes on insulation breakdown performance of ETFE aviation cables

LI Lili LI Yuzhe LI Xiaokun FU Lei WANG Yulong HAN Shuang GAO Junguo

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 217701 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250932

CSTR: 32037.14.aps.74.20250932

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250932>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

元素掺杂对储氢容器用高强钢性能影响的第一性原理和分子动力学模拟

First principles and molecular dynamics simulations of effect of dopants on properties of high strength steel for hydrogen storage vessels

物理学报. 2024, 73(6): 067101 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231735>

微结构表面几何特性对水蒸气凝结影响的分子动力学研究

Molecular dynamics study on influence of geometric characteristics of microstructure surface on steam condensation

物理学报. 2025, 74(14): 143101 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250324>

铀铌合金神经网络势函数构建及其低温时效性质的分子动力学

Construction of neural network potential for uranium–niobium alloy and molecular dynamics of its low–temperature aging behaviors

物理学报. 2025, 74(5): 056102 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241084>

温度对CoCrFeMnNi高熵合金冲击响应和塑性变形机制影响的分子动力学研究

Molecular dynamics study of temperature effects on shock response and plastic deformation mechanism of CoCrFeMnNi high–entropy alloys

物理学报. 2022, 71(24): 246101 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221621>

碳化硅中点缺陷对热传导性能影响的分子动力学研究

Molecular dynamics study of effects of point defects on thermal conductivity in cubic silicon carbide

物理学报. 2022, 71(3): 036501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211434>

不同润湿条件下带正弦凸起粗糙表面上气泡成核的分子动力学研究

Molecular dynamics study on bubble nucleation on rough surfaces with sinusoidal protrusions under different wetting conditions

物理学报. 2025, 74(20): 204701 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250717>