

基于局部放电理论的聚合物电介质击穿动力学理论研究*

李丹 胡海云†

(北京理工大学物理学院, 北京 100081)

(2013年9月23日收到; 2014年1月14日收到修改稿)

随着电力设备电压等级的提高, 对电力设备中聚合物电介质材料的可靠性提出了更加严格的要求, 然而由于聚合物电介质材料在生产制造过程中不可避免的存在气泡、杂质等缺陷, 导致在高电场作用下会发生局部放电从而大大降低了电力设备的使用寿命. 因此, 为了预防和减少电力设备中因聚合物电介质材料老化所带来的事故, 需要合理地估算其电老化寿命. 本文从局部放电老化模型的微观机理出发, 利用非平衡态统计理论建立了电裂纹不断扩展的随机微分方程, 然后推导出聚合物电介质的击穿概率、可靠性以及电老化寿命与外加电场的函数关系. 最后, 对聚苯二甲酸乙二醇酯 (polyethylene terephthalate, PET) 薄膜材料进行具体分析, 将电老化寿命公式的理论值与实验数据作了比较, 发现实验数据与理论值较为相符. 因此, 本文推导的聚合物电介质电老化寿命公式可以有效地应用在定量分析中, 并有望为材料的电寿命预测提供帮助.

关键词: 局部放电模型, 非平衡统计理论, 电老化寿命**PACS:** 77.22.Jp, 51.50.+v, 52.80.Dy, 05.20.Dd**DOI:** 10.7498/aps.63.117701

1 引言

聚合物材料因具有击穿场强高、介电损耗低、耐腐蚀性强和易于加工制造等诸多优良的物理化学性能而广泛应用于电力设备中^[1]. 随着用电负荷和输电距离的不断增大, 电力设备的电压等级逐渐提高, 对聚合物介电材料的可靠性提出了越来越高的要求. 然而, 由于聚合物介电材料在生产制造过程中不可避免的存在气泡、杂质等缺陷, 会在外加电场的作用下产生局部放电. 虽然局部放电一般不会引起绝缘材料的穿透性击穿, 但长期存在的局部放电可以导致聚合物电介质的局部损坏甚至击穿, 从而大大降低电力设备的使用寿命. 因此, 研究聚合物介电材料的电老化和击穿机理具有十分重要的理论意义和现实意义^[2].

目前, 聚合物介电材料的击穿问题已引起了众

多学者的关注^[3-5], 并有许多理论对介电材料电老化过程中所出现的现象和规律进行了解释, 主要可分为三类: 1) 从晶体和气体物质方面提出了雪崩击穿理论^[6]、电子电流击穿理论^[7]、气体导电通道理论^[8]、局域缺陷扩展理论^[9]等, 这些老化击穿理论大多只能解释聚合物老化击穿的个别现象, 存在一定局限性, 对电老化规律的描述停留于经验公式上^[10]; 2) 从聚合物的物质结构、能带结构和化学结构的特点出发, 提出了电子非辐射能量转移理论^[11]、电荷陷阱理论^[12]等老化击穿理论, 将老化机理的研究集中在寻找高能电子的形成机理上, 并利用陷阱密度作为衡量老化程度的参数, 从理论上推导出老化公式, 进一步完善了电树枝老化理论; 3) 研究放电脉冲的频率、前沿、波尾、脉宽等波形参数来探讨各种外加条件^[13]对聚合物绝缘材料电老化的影响. 但是, 由于聚合物的结构非常复杂, 至今还没有能够解释所有聚合物电老化现象的动力

* 国家自然科学基金 (批准号: 11272053) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: huh@bit.edu.cn

学模型.

本文在非平衡统计理论的基础上, 根据局部放电老化模型, 研究了聚合物电老化及击穿机理的动力学理论, 推导出聚合物电老化平均寿命与外加电场的函数关系. 通过与相关实验数据进行对比, 验证了电老化平均寿命公式的有效性, 从而为合理估算聚合物电介质的电老化平均寿命提供了一种有效的方法.

2 物理图像

由于材料内部的微观成分、缺陷及相结构的不均匀性, 其微观结构可看成是平均结构背景上叠加了不均匀性的涨落, 其中, 平均结构是确定的, 不均匀性涨落是随机的. 电裂纹在实际长大过程中, 其长大速率因这种不均匀性涨落的随机存在都将与其所经途径密切相关. 因此, 可以将电裂纹在材料内部的长大过程看成随机过程或叫做非平衡统计过程^[14], 这个过程可用广义朗之万方程^[15]描述

$$\frac{dl}{dt} = K(l, t) + f(l, t) = \beta(l)A + \beta(l)f(t), \quad (1)$$

其中, l 为电裂纹长度, t 为交变电压作用的时间, $K(l, t) = \beta(l)A$ 为电裂纹长大速率的确定性部分, $\beta(l)$ 为电裂纹长大函数, A 为与时间无关的系数, $f(l, t) = \beta(l)f(t)$ 是电裂纹长大速率的随机性部分, $f(t)$ 可看作均值为零且服从高斯分布的函数.

3 局部放电寿命模型

本文的局部放电理论模型主要来源于 Bahder 等依据高聚物中由于链堆积的缺陷而形成自由体积的理论. 该理论认为^[16]: 在高聚物内存在着连接气泡与微气泡并贯穿它的微小通道网络, 电离气体分子形成的空间电荷将从放电流柱注入到这种微通道内, 同时, 这些电荷将穿过分枝的微通道网络呈树枝分形结构向前发展, 在电荷分枝的顶端, 电场极大的增加, 从而使电荷继续向前运动. 一个雪崩的电裂纹长度 l 与 $(E - E_{th})$ 成正比, 即

$$l = \frac{E - E_{th}}{b}, \quad (2)$$

其中, E 为外加电场强度, E_{th} 为老化阈值电场强度, b 为材料常数.

此模型表明: 当外加电场低于老化阈值电场时, 不会出现老化或老化速率明显减弱; 当外加电

场大于老化阈值电场时, 击穿时间与外施电压存在反幂定律.

3.1 电裂纹长大速率的确定性部分

我们根据气体放电的汤生理论可知^[17], 电裂纹长度为 l 的一个雪崩内产生的自由电子数 Q 为

$$Q = n - n_0 = n_0 (e^{\alpha l} - 1), \quad (3)$$

其中, n 是一个雪崩后电裂纹内的自由电子数, n_0 是雪崩前电裂纹内的自由电子数, α 是电子碰撞电离系数.

Bahder 模型认为^[16], 电荷运动使高分子键断裂, 在交流电压下, 电流脉冲数与 $f \cdot t$ 成正比, 所以有

$$Q = 120ftn_0 \left[e^{\alpha \left(\frac{E - E_{th}}{b} \right)} - 1 \right], \quad (4)$$

其中, $120f \cdot t$ 是半周期内交流电压脉冲次数, f 为频率.

根据电动力学理论, 建立外电场后, 电裂纹与介质的界面将产生 $\sigma = \epsilon \epsilon_0 E$ 的电荷面密度. 所以

$$n_0 = \epsilon \epsilon_0 s E / e^*, \quad (5)$$

其中, s 为缺陷在垂直于外电场方向上的横截面积, ϵ 为介质的相对介电常数, ϵ_0 为真空介电常数, e^* 是电子有效电量.

在 dt 时间内, 电子与晶格发生碰撞电离, 使体积为 sdl 的介质电离, 进而使电裂纹不断长大, 所以在电子数上存在如下等量关系:

$$120fn_0 \left[e^{\alpha \left(\frac{E - E_{th}}{b} \right)} - 1 \right] (dt/\tau) = Nsdl, \quad (6)$$

式中, N 为介质单位体积内所包含的原子数目, τ 为电子的平均碰撞时间.

根据电子电流击穿理论^[7]可知

$$\begin{aligned} \lambda &= 1/(\pi r^2 N), \\ v &= \sqrt{3kT/m^*}, \\ \tau &= \lambda/v, \end{aligned} \quad (7)$$

其中, λ 为电子平均自由程, r 为离子半径, v 为电子的平均速率, m^* 为电子的有效质量, k 为玻尔兹曼常数, T 为热力学温度. 在固体力学中, τ, λ 均作为可调参量^[18]. 由于介质存在缺陷, 所以 $E \neq U/L$, U 为外加电压, L 为介质沿电场方向的厚度. 假设缺陷与基体的体积之比为 p , 可知

$$E = \frac{U}{L} \left[\frac{L}{L - m(p)l} \right] = E_0 \left[\frac{L}{L - m(p)l} \right], \quad (8)$$

其中, $E_0 = \frac{U}{L}$, $m(p)$ 为沿电场方向截面积为 s 的小柱体内含有的缺陷数目, 对于实际材料 $p \ll 1$ 总是满足的, 所以 $m(p) \approx 1$.

最终得到电裂纹长大速率的确定性部分为

$$\frac{dl}{dt} = 120f\varepsilon\varepsilon_0E_0 \left[\frac{L}{L-l} \right] \times \left(e^{\frac{\alpha}{6}[E_0(\frac{L}{L-l}) - E_{th}]} - 1 \right) \times \pi r^2 \sqrt{3kT/m^*} (e^*)^{-1}, \quad (9)$$

即得

$$A = 120f\varepsilon\varepsilon_0\pi r^2 \sqrt{3kT/m^*} / e^*,$$

$$\beta(l) = E_0[L/(L-l)] \times \left(e^{\frac{\alpha}{6}[E_0(\frac{L}{L-l}) - E_{th}]} - 1 \right). \quad (10)$$

3.2 电裂纹长大速率的随机性部分

假设(10)式中各量在系统内部有很小的涨落, 则决定缺陷扩展的宏观量围绕平均值有一很小的涨落, 即

$$K_i = \langle K_i \rangle + \Delta K_i, \quad (11)$$

其中, $K_i (i = 1, 2, 3 \dots)$ 代表 e^* , ε 等.

因扩展速率 $K(l, t)$ 是这些宏观量平均值的函数, 则长大速率的随机性部分为

$$f(l, t) = \sum_i \left(\frac{\partial l}{\partial K_i} \right)_{\langle K_i \rangle} \Delta K_i. \quad (12)$$

因此, 方程(12)可以写成

$$f(l, t) = \beta(l)A \sum_i f_i(\langle K_1 \rangle, \langle K_2 \rangle, \langle K_3 \rangle \dots, \langle K_n \rangle) \times \Delta K_i (\langle K_i \rangle)^{-1}, \quad (13)$$

其中, f_i 是宏观量平均值的函数.

3.3 击穿概率与可靠性

根据随机理论^[19], 与朗之万方程对应的福克普朗克方程^[20]为

$$\frac{\partial P(l, t)}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial l} \left\{ \left[A\beta(l) + \frac{D}{2}\beta(l) \frac{\partial \beta(l)}{\partial l} \right] P(l, t) \right\} + \frac{D}{2} \frac{\partial^2}{\partial l^2} [\beta^2(l) P(l, t)], \quad (14)$$

涨落长大系数 D 可以表示为^[21]

$$D = A^2 D' = A^2 \sum_i f_i^2 (\langle K_1 \rangle, \langle K_2 \rangle, \langle K_3 \rangle \dots, \langle K_n \rangle) \times \langle \Delta K_i^2 \rangle \tau_0 / \langle K_i \rangle^2, \quad (15)$$

其中, τ_0 , D' 为一待定常数. $P(l, t)$ 为时刻 t 缺陷长度在 $l \rightarrow l + dl$ 之间的概率, $P(l, t)$ 满足归一化条件

$$\int_{l_0}^{\infty} P(l_0, l; t) dl = 1, \quad (16)$$

同时满足起始和边界条件

$$P(l_0, l; t = 0) = \delta(l - l_0),$$

$$P(l \rightarrow \infty, t) = 0. \quad (17)$$

满足方程(14)及条件(16)和(17)的精确解为

$$P(l, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi Dt\beta(\bar{l})} \exp\left(-\frac{(\bar{l} - At)^2}{2Dt}\right)}, \quad (18)$$

其中,

$$\bar{l} = \int_{l_0}^l \frac{1}{\beta(l)} dl$$

为电裂纹长度平均值, l_0 是电裂纹的初始长度, 当电裂纹长度达到临界值 \bar{l}_m 时, 即电裂纹的累积长大阶段结束, 开始进入快速失控扩展阶段. 正是在这一阶段, 相伴产生的电或热过程导致电介质击穿发生. 因此, 单个缺陷引起电介质击穿的概率就是单个缺陷处于 $\bar{l} > \bar{l}_m$ 的概率

$$w(\bar{l}_m, t) = \frac{1}{\sqrt{\pi} \int_x^{\infty} \exp(-x^2) dx}, \quad (19)$$

其中,

$$x = (\bar{l}_m - At) / \sqrt{2Dt}.$$

考虑存在多个缺陷的情况, 一般情况下并不是所有的缺陷对击穿的贡献都是一样的, 只有当缺陷沿外电场方向时, 对击穿的贡献才是最大的. 对击穿有主要贡献的缺陷数目为 $N_c = c(p)V$, $c(p)$ 是单位体积内的缺陷数目, 即数密度. 从理论上很难确定 $c(p)$ 的值, 实验发现 $c(p) \propto p^\delta$, δ 约为 0.5^[22]. 根据最弱链模型, 并考虑到 $w(\bar{l}_m, t)$ 很小, 得到在 0 到 t 时间内介质发生击穿的概率为

$$P(t, E_0) = 1 - [1 - w(\bar{l}_m, t)]^{N_c} \approx 1 - \exp[-N_c w(\bar{l}_m, t)], \quad (20)$$

通过求解 \bar{l}_m , 以及引入近似公式

$$\frac{1}{\sqrt{\pi} \int_x^\infty \exp(-x^2) dx} \approx \frac{\omega}{x^{10}},$$

其中 $x > 2.0$, $\omega = 2.1$ ^[21], 可得击穿概率

$$P(t, E_0) = 1 - \exp\left[-\frac{N_c (2Dt)^5 \omega}{(\bar{l}_m - At)^{10}}\right]. \quad (21)$$

击穿概率与可靠性是相对的概念. 介电材料的可靠性指在外界因素作用下材料仍能安全承载电场而不发生电击穿的概率, 用 $R(t)$ 表示, 则

$$\begin{aligned} R(t) &= 1 - P(t, E_0) \\ &= \exp\left[-\frac{N_c (2Dt)^5 \omega}{(\bar{l}_m - At)^{10}}\right], \end{aligned} \quad (22)$$

根据 \bar{l}_m 与 At 的关系对 (21) 式讨论如下:

1) 当 $E_0 < E_c$, E_c 为材料的本征击穿场强, 在 t 不是很大时, $\bar{l}_m \gg At$ 总是满足的, 此时 At 项可忽略.

2) 当 \bar{l}_m 与 At 同数量级时^[21], $\bar{l}_m - At \approx 0$ 由 (18) 式可得 $P(t, E_0) \approx 1$, 即此时早已击穿, 可略去 At 项.

所以击穿概率为

$$P(t, E_0) = 1 - \exp\left[-\frac{N_c (2Dt)^5 \omega}{(\bar{l}_m)^{10}}\right], \quad (23)$$

将 (23) 式写成

$$P(t, E_0) = 1 - \exp[-g(E_0)t^5], \quad (24)$$

其中,

$$g(E_0) = \frac{N_c (2D)^5 \omega}{(\bar{l}_m)^{10}}.$$

3.4 平均寿命

(24) 式是关于 t 的 weibull 分布, 与经验公式完全一致^[22].

由 $P(t, E_0)$ 的物理意义可知, $\partial P(t, E_0)/\partial t$ 代表材料在 E_0 作用下, 在 t 时刻单位时间内的击穿概率, 即材料的寿命分布函数, 用 $M(t, E_0)$ 来表示, 则

$$\begin{aligned} M(t, E_0) &= \partial P(t, E_0)/\partial t \\ &= 5t^4 g(E_0) \exp[-g(E_0)t^5], \end{aligned} \quad (25)$$

已知材料的寿命分布函数, 即可求得它的平均寿命 τ_{life} , 得

$$\tau_{\text{life}} = \int_0^\infty tM(t, E_0) dt$$

$$= \Gamma\left(\frac{6}{5}\right) [g(E_0)]^{-1/5}, \quad (26)$$

将 $g(E_0)$ 代入 (26) 式既得平均寿命表达式

$$\begin{aligned} \tau_{\text{life}} &= \Gamma\left(\frac{6}{5}\right) \left[\frac{N_c 2D^5 \omega}{(\bar{l}_m)^{10}}\right]^{-1/5} \\ &= \Gamma\left(\frac{6}{5}\right) (N_c \omega)^{-1/5} (2D')^{-1} \\ &\quad \times \left(\frac{120 f \varepsilon \varepsilon_0 \pi r^2 \sqrt{3kT/m^*}}{e^*}\right)^{-2} \\ &\quad \times \left[\bar{l}_m \left(L - \frac{\bar{l}_m}{2}\right)\right]^2 \left\{ E_0 L \left[\exp\left[\frac{\alpha}{b}\right.\right.\right. \\ &\quad \left.\left.\left.\times \left(\frac{E_0 L}{L - \bar{l}_m/2} - E_{\text{th}}\right)\right] - 1\right]\right\}^{-2}. \end{aligned} \quad (27)$$

4 与实验对比及定性分析

当聚合物为 PET 薄膜时, (24) 式中各参数可合理取值为

$$\begin{aligned} N_c &= 1000, \quad \omega = 2.1, \quad \bar{l}_m = 1.6 \times 10^{-6} \text{ m}, \\ D' &= 8.5 \times 10^{-20}, \quad \alpha = 2000 \text{ m}, \\ f &= 2.5 \times 10^5 \text{ Hz}, \quad \varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/C}, \\ \varepsilon &= 4.8, \quad r = 7.296 \times 10^{-10} \text{ m}, \\ k &= 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}, \quad m^* = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}, \\ e^* &= 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}, \quad T = 298 \text{ K}, \quad b = 2, \\ E_{\text{th}} &= 1 \times 10^6 \text{ V/m}, \quad L = 2 \times 10^{-5} \text{ m}. \end{aligned}$$

将各参数的值代入 (24) 式的理论结果与 PET 薄膜的实验数据^[23] 进行比较, 结果如图 1 所示.

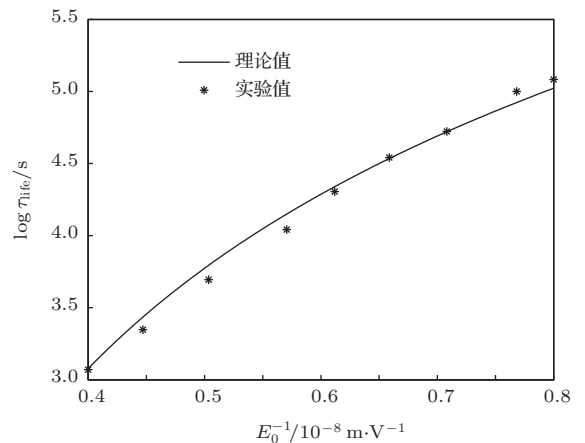


图 1 PET 薄膜 $\log(\tau_{\text{life}})$ 对 E_0^{-1} 理论值与实验值的比较

由图 1 可知, 聚合物电老化平均寿命与外加电场函数关系的理论值与实验值符合的较好. 并且由 (27) 式还可得到 $\tau_{\text{life}} \propto e^{-\alpha}$, 即碰撞电离系数 α 的增大会加速聚合物介电材料的老化. 因为碰撞电离系数的增大意味着产生出更多的自由电子, 从而加快了电裂纹的扩展. 同时由 (27) 式可知 $\tau_{\text{life}} \propto 1/f$ 和 $\tau_{\text{life}} \propto 1/T$, 所以随着脉冲频率的增大或温度的升高, 也都会使材料老化加速, 平均寿命降低, 这些理论分析结果与实际介电材料的老化情况是一致的.

5 结 论

本文从局部放电微观机理出发, 利用非平衡统计理论建立了聚合物电介质材料击穿过程的宏、微观之间的联系. 由此导出的平均寿命公式所得理论值与实验值符合的较好, 这在一定程度上说明了根据非平衡统计理论推导的聚合物材料的平均寿命公式具有一定的有效性. 但是, 由于聚合物介电材料的击穿概率和可靠性的实验数据非常有限, 所以还需要采集不同聚合物材料的实验数据对本文推导的公式进行验证.

参考文献

- [1] Yang K, Zhang G Z, Zhao W B, Yan Z 2008 *Chin. Soc. for Elec. Eng.* **28** 148 (in Chinese)[杨凯, 张冠军, 赵文彬, 严璋 2008 中国电机工程学报 **28** 148]
- [2] Li S T, Zheng X Q 2006 *Polymer Electrical Treeing* (Beijing: China Machine Press) p10 (in Chinese) [李盛涛, 郑晓泉 2006 聚合物电树枝化 (北京: 机械工业出版社) 第 10 页]
- [3] Zheng X Q, Xie A S, Li S T 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5494 (in Chinese)[郑晓泉, 谢安生, 李盛涛 2007 物理学报 **56** 5494]
- [4] Chen X R, Xu Y, Liu Y, Cao X L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 087701 (in Chinese) [陈向荣, 徐阳, 刘英, 曹晓珑 2012 物理学报 **61** 087701]
- [5] Zhao L, Su J C, Pan Y F, Zhang X B 2012 *Chin. Phys. B* **21** 033102
- [6] Stratton R 1961 *Prog. Dielectrics* **3** 233
- [7] O'Dwyer J J 1969 *J. Electrochem. Soc.* **116** 239
- [8] Budenstein P P 1980 *IEEE Trans. Electron. Insul.* **15** 225
- [9] Jonscher A K, Laccoste R 1984 *IEEE Trans. Electron. Insul.* **19** 190
- [10] Simoni L 1981 *IEEE Trans. Electron. Insul.* **16** 277
- [11] Kao C K 1984 *J. Appl. Phys.* **55** 752
- [12] Liao R J, Zhou T C, Chen G, Yang L J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 017201 (in Chinese) [廖瑞金, 周天春, George Chen, 杨丽君 2012 物理学报 **61** 017201]
- [13] Xie A S, Li S T, Zheng X Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3828 (in Chinese)[谢安生, 李盛涛, 郑晓泉 2008 物理学报 **57** 3828]
- [14] Xing X S 1991 *Adv. Mech.* **21** 153 (in Chinese)[邢修三 1991 力学进展 **21** 153]
- [15] Xing X S 1986 *Sci. Chin.* (Vol. A) **29** 501 (in Chinese) [邢修三 1986 中国科学 (A 辑) **29** 501]
- [16] Bahder G, Garrity T, Duxbury M 1983 *Phys. Rev. Lett.* **53** 1121
- [17] Townsend J S 1910 *The Theory of Ionization of Gases by Collision* (London: Constable & Company Ltd.) pp1-24
- [18] O'Dwyer J J 1984 *IEEE Trans. Electron. Insul.* **19** 1
- [19] Kottalam J, Lindenberg K, West B J 1987 *J. Stat. Phys.* **42** 979
- [20] Van Kampen N G 1981 *J. Stat. Phys.* **24** 175
- [21] Zou J, Xing X S 1997 *Trans. Beijing Inst. Technol.* **17** 160 (in Chinese) [邹健, 邢修三 1997 北京理工大学学报 **17** 160]
- [22] Dissdo L A, Fothergill J C 1992 *Electrical Degradation and Breakdown in Polymers* (London: Peter Peregrinus Ltd.) pp323-329
- [23] Liu F D, Yang B T, Tu D M 1992 *Acta Phys. Sin.* **41** 333 (in Chinese)[刘付德, 杨百屯, 屠德民 1992 物理学报 **41** 333]

Studies on the kinetic theory of polymer dielectric breakdown due to partial discharge^{*}

Li Dan Hu Hai-Yun[†]

(School of Physics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(Received 23 September 2013; revised manuscript received 14 January 2014)

Abstract

With the improvement of voltage level of electrical equipment, the requirement for the reliability of polymer dielectric materials in electrical equipment is much more strict. However, there are inevitably some defects in the manufacturing process of polymer dielectric materials, such as bubbles, inclusions, and so on. Therefore the life of electrical equipment will be greatly decreased when partial discharge occurs in a high electric field. In order to prevent and reduce the accident caused by the aging of polymer dielectric material in the electrical equipment, electrical aging life needs to be reasonably estimated. Based on the microscopic mechanism of partial discharge aging model, this paper suggests a stochastic differential equation for the electrical crack growth by using a non-equilibrium statistical physics theory, and then functions of breakdown probability, reliability, and electrical aging life due to the application of electric field are derived. Finally, a detailed analysis for the polyethylene terephthalate (PET) film is carried out, and the theoretical life of electrical aging is compared with experimental data. Results show that the theoretical values are consistent with the experimental data. So the aging life equations of polymer dielectrics derived in this paper can be used effectively in the quantitative analysis and may be helpful for the estimation of electrical life.

Keywords: partial discharge model, non-equilibrium statistical theory, electrical aging life

PACS: 77.22.Jp, 51.50.+v, 52.80.Dy, 05.20.Dd

DOI: [10.7498/aps.63.117701](https://doi.org/10.7498/aps.63.117701)

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11272053).

[†] Corresponding author. E-mail: huh@bit.edu.cn