

基体电导率对 0-3 型铁电复合材料高压极化行为及损耗的影响^{*}

杨凤霞^{1)†} 张端明¹⁾ 邓宗伟¹⁾ 姜胜林²⁾ 徐 洁¹⁾ 李舒丹¹⁾

1) 华中科技大学物理系, 武汉 430074)

2) 华中科技大学电子系, 武汉 430074)

(2007 年 9 月 29 日收到, 2007 年 11 月 7 日收到修改稿)

提出了一个 0-3 型聚合物基铁电复合材料的直流高压极化模型. 模型中考虑了聚合物/铁电陶瓷界面处自由电荷的积聚及极化初始时刻的真实情况, 利用拉普拉斯静电场方程, 并结合边界条件, 得到了直流高压极化过程中复合材料的极化强度、界面电流密度等随时间的演化方程, 同时得到介电常数、介质损耗等物理特性的表达式. 此外, 实验制备了分别以环氧树脂 E-44 和铁电共聚物 P(VDF-TrFE) 为基体的两种 0-3 型铁电复合材料. 从理论和实验两方面研究了基体电导率对极化行为以及介质损耗的影响. 两方面结果均表明: 随基体电导率增加, 极化时间缩短, 陶瓷相的极化强度及复合材料的整体电性能提高, 但是漏电流及介质损耗增加, 而且实验结果与直流高压极化模型的预测结果符合.

关键词: 铁电复合材料, 电导率, 极化, 介质损耗

PACC: 7780, 7700, 7730, 7740

1. 引 言

铁电陶瓷与铁电聚合物组成的铁电复合材料, 其工艺处理过程类似铁电陶瓷, 需要在一定的电场下极化处理, 使得铁电相的自发极化强度沿外场取向^[1]. 但是, 复合材料在极化过程中, 由于各组分的电导率不同, 在它们分界面必将产生自由电荷的积聚, 导致复合材料电荷分布不均, 电极化将有一个从始态到稳态的过渡过程^[2], 而施加在铁电相的电场、极化程度、极化强度以及界面电流密度均随时间演化, 其变化规律应与组分的电导率有关. 实验结果^[3,4]已经证实了这一点. 同时, 复合材料一般需要在高压下极化, 而分界面自由电荷的积聚会产生过大的漏电流, 导致材料的击穿, 而漏电流也与组分的电导率有关. 因此, 控制组分的电导率是制备工艺中关键的因素之一.

此外, 衡量铁电体质量的一个重要参数是介电损耗. 由于铁电体不是理想的绝缘体, 其内部存在一定的自由电荷, 在电场作用下将产生定向迁移, 必然

形成漏导电流, 因此, 在实际材料中, 总的介质损耗由电介质弛豫极化产生的介电损耗和漏电流形成的漏导损耗两部分组成^[5]. 对于铁电复合材料, 其漏导损耗与组成相的电导率有关, 特别是组成相电导率过大, 会出现渗流现象^[6,7], 在高电场作用下容易击穿样品, 降低复合材料的极化性能, 因此, 研究组成相的电导率对介电损耗的影响, 对于实际的材料设计和极化工艺处理具有重要的意义.

近年, Wong 等人^[8,9]从理论上研究了组成相电导率对铁电复合材料的压电、热释电性能的影响, 但是迄今为止, 对在直流高压极化情况下, 基体的电导率对复合材料极化行为及介质损耗的影响尚未见详细报道. 基于此, 作者建立了一个铁电颗粒/聚合物 0-3 型铁电复合材料的直流极化模型. 在该模型中, 考虑了复合材料极化初始时刻的真实情况, 即 $t = 0$ 时, 铁电颗粒、复合材料的自发极化强度及铁电颗粒/聚合物界面的自由电荷均为 0 ($q_0 = 0, p = 0$), 并结合边界条件, 获得了极化强度及界面电流密度随时间的演化. 此外, 作者制备了两种不同基体的 0-3 型复合材料——PZT/epoxy 和 PZT/P(VDF-TrFE), 同

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 10675048)和华中科技大学理学院基金(批准号: 0101012103)资助的课题.

[†] E-mail: yangsunny3445@163.com

时从理论和实验两方面研究了基体的电导率对复合材料极化行为及介质损耗的影响。

2. 物理模型

由铁电颗粒与聚合物两相材料组成的 0-3 型铁电复合材料,我们有如下 1)和 2)假设及初始条件 3):

1)介电常数为 ϵ_i 具有相同平均半径 R 的近球形铁电颗粒 随机分布在介电常数为 ϵ_m 的聚合物中,形成了纯 0-3 型复合材料,其中基体不具有铁电性;

2)组成相均是横观各向同性的有效介质,复合材料沿 Z 轴极化,因此系统关于 Z 轴对称;

3) $t=0$ 时刻,铁电颗粒、复合材料的自发极化强度及铁电颗粒/聚合物界面的自由电荷均为 0,即 $q_0 = 0, p = 0$ 。

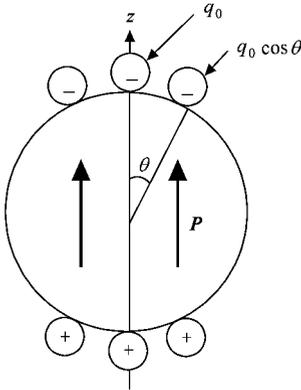


图 1 界面电荷分布图

当沿 Z 方向施加 E_0 的极化电压.在极化过程中,由于铁电颗粒与聚合物的电导率不同,在分界面上形成大小为 $q_0 \cos \theta$ 的自由电荷^[10](见图 1),而单位时间内聚积在单位界面面积上的电荷为 $\partial q_0 / \partial t \cos \theta$.根据平均场理论^[11],复合材料的平均电场 E 、电位移 D 、电导产生的电流密度 j 及总电流密度 J 为组成相的体积平均,即

$$E = \phi E_i + (1 - \phi) E_m = E_0, \quad (1a)$$

$$D = \phi D_i + (1 - \phi) D_m, \quad (1b)$$

$$j = \phi j_i + (1 - \phi) j_m, \quad (1c)$$

$$J = j + \partial D / \partial t, \quad (1d)$$

其中各组分的电流密度及电位移分别定义为

$$j_i = \sigma_i E_i, \quad (2a)$$

$$j_m = \sigma_m E_m, \quad (2b)$$

$$D_i = \epsilon_i E_i + P_i, \quad (2c)$$

$$D_m = \epsilon_m E_m + P_m, \quad (2d)$$

上面各式中,下标 m 和 i 分别代表基体和陶瓷相, ϕ 为陶瓷相的体积比, P 、 ϵ 和 σ 分别为极化强度、介电常数和电导率。

对于单个球形颗粒,球坐标下的拉普拉斯静电场方程为

$$\left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta} \right) \right] \varphi = 0. \quad (3)$$

(3) 式的通解可表示为

$$\varphi_m = \sum_{n=0}^{\infty} \left(A_n r^n + \frac{B_n}{r^{n+1}} \right) P_n(\cos \theta), \quad (4a)$$

$$\varphi_i = \sum_{n=0}^{\infty} \left(C_n r^n + \frac{D_n}{r^{n+1}} \right) P_n(\cos \theta), \quad (4b)$$

其中 φ_i 和 φ_m 分别代表颗粒内、外的电势, A_n 、 B_n 、 C_n 和 D_n 是待定系数, $P_n(\cos \theta)$ 是勒让德多项式.当考虑分界面自由电荷的积聚,边界条件为

$$(\varphi_m)_{r \rightarrow \infty} = -E_m x = -E_m r \cos \theta, \quad (5a)$$

$$\varphi_i|_{r=R} = \varphi_m|_{r=R}, \quad (5b)$$

$$\begin{aligned} & -\epsilon_i \left(\frac{\partial \varphi_i}{\partial r} \right) + p_i \cos \theta|_{r=R} \\ & = -\epsilon_m \left(\frac{\partial \varphi_m}{\partial r} \right) + p_m \cos \theta|_{r=R} + q_0 \cos \theta, \end{aligned} \quad (5c)$$

$$\text{在球心处 } (r=0), \varphi_i \text{ 是有限值.} \quad (5d)$$

按照边界条件(5a)–(5d)和勒让德多项式线性独立的性质,联立求解得

$$C_1 = \frac{-3\epsilon_m E_m + P_i - P_m - q_0}{2\epsilon_m + \epsilon_i}, \quad (6a)$$

$$C_n = 0, n \neq 1. \quad (6b)$$

从而得到颗粒内的平均电场 E_i 为

$$E_i = \frac{3\epsilon_m E_m - P_i + P_m + q_0}{2\epsilon_m + \epsilon_i}. \quad (7a)$$

联立(1)(2)和(7a)式,进一步可表示为

$$D_i + 2\epsilon_m(E_i - E_m) = D_m + q_0. \quad (7b)$$

类似地,可得到电流密度表达式为

$$j_i + 2\sigma_m(E_i - E_m) = j_m - \partial q_0 / \partial t, \quad (8a)$$

或者

$$(\sigma_i + 2\sigma_m) E_i = 3\sigma_m E_m - \partial q_0 / \partial t. \quad (8b)$$

联立(1a)(7a)和(8b)式,且不考虑基体的铁电性,即 $P_m = 0$,可得如下关系式:

$$\frac{\partial E_i}{\partial t} + \frac{E_i}{\tau} = L_E \frac{E_0}{\tau_m} - \frac{(1-\phi)}{\phi 3\epsilon_m + (1-\phi)(\epsilon_i + 2\epsilon_m)} \times \frac{\partial P_i}{\partial t}, \quad (9)$$

其中

$$L_E = \frac{3\epsilon_m}{\phi 3\epsilon_m + (1-\phi)(\epsilon_i + 2\epsilon_m)}, \quad (10a)$$

$$\tau = \frac{\phi 3\epsilon_m + (1-\phi)(\epsilon_i + 2\epsilon_m)}{\phi 3\sigma_m + (1-\phi)(\sigma_i + 2\sigma_m)}, \quad (10b)$$

$$\tau_m = \frac{\epsilon_m}{\sigma_m}. \quad (10c)$$

利用初始条件(3)及表达式(7a),可得 $t=0$ 时刻施加在铁电相的平均电场强度为

$$E_i |_{t=0} = \frac{3\epsilon_m}{(1-\phi)(\epsilon_i + 2\epsilon_m) + 3\phi\epsilon_m} E_0. \quad (11)$$

而达到稳态后,由于 $\frac{\partial P_i}{\partial t} = 0$ 及 $\frac{\partial E_i}{\partial t} = 0$,由(4)式得到铁电相的平均电场强度为

$$E_i = \tau L_E \frac{E_0}{\tau_m} = L_\sigma E_0, \quad (12)$$

其中

$$L_\sigma = \frac{3\sigma_m}{\phi 3\sigma_m + (1-\phi)(\sigma_i + 2\sigma_m)}. \quad (13)$$

此外,根据 Miller 等^[12]的模型,铁电材料的极化强度与外加电场强度之间存在如下关系式:

$$\frac{\partial P}{\partial E} = \left(1 - \tanh \sqrt{\frac{P - P_{\text{sat}}}{P_s - P}} \right) \frac{\partial P_{\text{sat}}}{\partial E}, \quad (14a)$$

$$P_{\text{sat}} = P_s \tanh \left[\frac{(E - E_c)}{2E_c} \ln \left(\frac{1 - (-P_r/P_s)^{1/n}}{1 + (-P_r/P_s)^{1/n}} \right) \right]^n, \quad (14b)$$

上式中, P_s 和 P_r 分别是饱和极化强度及剩余极化强度,对 PZT, $n = 5/11$. 因此,根据上面的初始条件

表 1 材料参数

材料	$\epsilon_r(120^\circ\text{C})$	$\epsilon_r(\text{室温})$	$\sigma/10^{-10} \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$	$\sigma/10^{-10} \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$	$\tan\delta/\%$ (1 kHz)
			(120 °C)	(室温)	
P(VDF-TrFE)	50	10	5	25	2
E-44	5	3.0	0.6	1	0.5
PZT	1700	1520	0.05	1.5	0.3

复合材料中的基体分别是 P(VDF-TrFE) (VDF: TrFE = 51/49wt%) 铁电共聚物和环氧树脂 E-44, 它们的具体参数列于表 1. PZT/P(VDF-TrFE) 复合材料利用涂覆法制备: 首先将 P(VDF-TrFE) 充分溶解在丙酮中, 然后将一定体积百分比的 PZT 颗粒倒入溶液中, 接着将混合溶液在 50°C 下超声搅拌 0.5 h 后,

及关系式(9)–(14), 可以得到极化过程中, 极化强度 P 及电流密度 J 随时间 t 的演化.

由(12)式可得到稳态的传导电流密度的表达式为

$$j = (1-\phi)\sigma_m E_m + \phi\sigma_i E_i = [\sigma_m + \phi L_\sigma(\sigma_i - \sigma_m)] E_0. \quad (15)$$

因此, 复合材料的电导率为

$$\sigma = \sigma_m + \phi(\sigma_i - \sigma_m)L_\sigma. \quad (16)$$

利用(1a)–(1b)及(11)式, 可以得到复合材料极化后的有效介电常数为

$$\epsilon = \phi(\epsilon_i - \epsilon_m)L_\sigma + \epsilon_m. \quad (17)$$

对于电介质材料, 在电场作用下, 其介质损耗一部分是由电介质弛豫极化产生的介电损耗 $\tan\delta_p$, 另一部分是漏电流形成的漏导损耗 $\tan\delta_c$, 即

$$\tan\delta = \tan\delta_p + \tan\delta_c, \quad (18)$$

其中 $\tan\delta_p$ 和 $\tan\delta_c$ 分别表示为

$$\tan\delta_p = \epsilon''/\epsilon', \quad (19a)$$

$$\tan\delta_c = \sigma/\omega\epsilon', \quad (19b)$$

这里 ϵ' 和 ϵ'' 分别为复合材料介电常数 ϵ 的实部和虚部, ω 是频率, 因此, 根据(16)–(19)式, 可以得到电场作用下复合材料的实际介质损耗.

3. 实验过程

实验中以锆钛酸铅(PZT)颗粒作为铁电相, 其化学成分为 $\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_{0.1}(\text{Zr}_{0.54}\text{Ti}_{0.46})_{0.99}\text{O}_3$, 采用传统的固相反应法制备而得, 其中原料均为氧化物, 其锻烧温度为 1280°C , 测得 PZT 块材的具体参数见表 1. 为了获得均匀的粉体, 我们将烧结后的块材捣碎, 球磨后 200 目过筛备用.

倒在干净的玻璃基片上, 随后放入敞开的干燥箱中, 在 80°C 温度下烘干, 让丙酮溶剂充分挥发, 最后将得到的膜剪碎, 在 120°C 温度和 10 MPa 压力下热压成块材. PZT/epoxy 采用共混法制备: 首先在 80°C 温度下使环氧树脂 E-44 融化, 然后加入一定体积百分比的 PZT 颗粒, 边搅拌边滴加适量的乙二胺固化

剂,搅拌均匀后倒在干净的玻璃基片上,在 80 °C 温度下烘烤 10 min,随后剪取厚膜,在 80 °C 温度及 10 MPa 压力下热压成块材.本实验中,复合材料样品的 PZT 体积百分比 ϕ 均为 30%.

将制备的 PZT/(VDF-TrFE)和 PZT/epoxy 复合材料分别在 80 °C 和 120 °C 的硅油中极化处理,随后短路放置 24 h 后测试其压电常数 d_{33} 、介电常数 ϵ 及介质损耗 $\tan\delta$,并利用 d_{33} 估算铁电陶瓷相的极化强度 P_i ,即^[1]

$$P_i \approx (d_{33}/\phi d_{33}^i)P_i^f, \quad (20)$$

这里 d_{33}^i 和 P_i^f 是 PZT 陶瓷的压电常数和极化强度.

4. 结果与讨论

4.1. 基体电导率对陶瓷相极化强度及极化时间的影响

图 2(a)是根据我们的模型预测的铁电陶瓷颗粒极化强度 P_i 随时间的演化过程,其中曲线 1—4 代表 PZT/epoxy 复合材料的理论结果,曲线 5—8 是 PZT/(VDF-TrFE)复合材料的理论结果,极化电压分别取为 4, 6, 8, 10 kV, 样品厚度均为 1 mm. 由图可知:当极化电压 E_0 由 4 kV 增加到 10 kV, 两种材料不仅达到稳态的时间明显缩短,而且陶瓷相的极化强度 P_i 显著增加;对 PZT/(VDF-TrFE)复合材料, 6 kV 以上的电压才可能充分极化它,而对 PZT/epoxy 复合材料,则需要更高极化电压 (≥ 8 kV) 和更长的极化时间. 作者认为,上述两种复合材料极化行为差异可能与基体具有不同的介电常数和电导率有关. 由表 1 测试数据可知,两种基体的介电常数差异较小,但是电导率的差异相当大,说明基体电导率应该是影响极化行为的主要因素. 此外 (12) 式也说明:随 σ_m 增加,施加在陶瓷相上的有效电场强度 E_i 增强,使得铁电陶瓷相极化程度增加,导致极化强度 P_i 提高. 而图 2(b) 中的理论预测结果更直观地展示了基体电导率 σ_m 对极化行为的影响比 ϵ_m 的影响显著,进一步说明基体电导率是影响极化行为的主要因素.

图 2(a) 中,符号 \star 和 \bullet 分别是根据测试的压电常数 d_{33} 及 (16) 式估算的 PZT/epoxy 和 PZT/(VDF-TrFE) 复合材料中 PZT 的极化强度 P_i , 其中极化时间为 0.5 h, 极化电压分别为 4, 6, 8, 10 kV. 显然,实验数据变化趋势与理论基本符合,但是实验数据偏

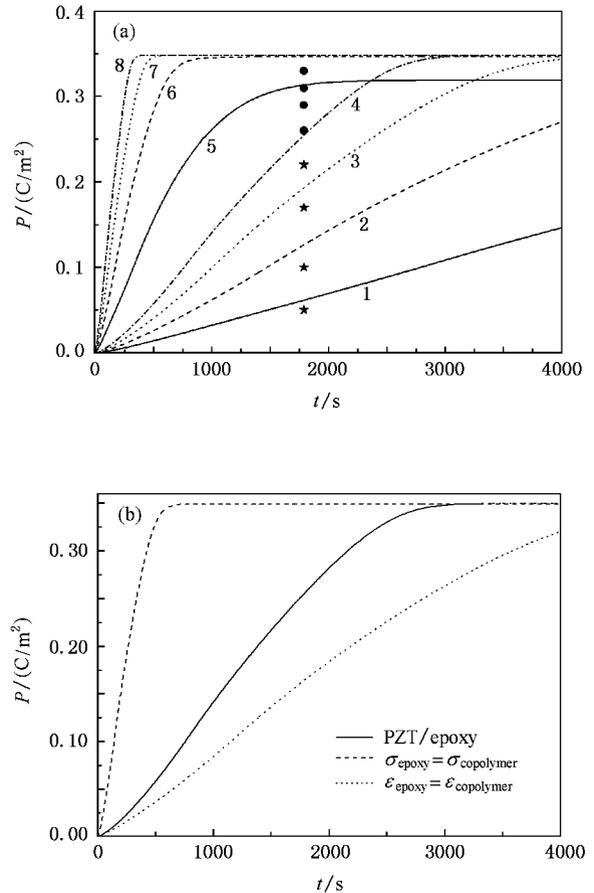


图 2 $\phi = 30\%$ 时 (a) 在不同极化电压和 (b) 不同基体电导率情况下, PZT 陶瓷相的 P_i 随 t 的变化(符号 \star 和 \bullet 分别是 PZT/epoxy 和 PZT/(VDF-TrFE) 复合材料中 PZT 的实际极化强度 P_i)

低于理论结果,主要原因有两点,一是在估算陶瓷相 PZT 的极化强度 P_i 时,我们近似认为 $d_{33i} \approx \phi d_{33}^i$ (见 (20) 式),没有考虑极化程度,导致估算的 P_i 偏低,另外,在实际复合材料中,随铁电陶瓷相含量 ϕ 增加,颗粒间的相互作用增强^[13],在上面的理论模型中,我们忽略了颗粒之间的相互作用,这使得理论预测结果偏高.

4.2. 基体电导率对漏电流及介质损耗的影响

在极化过程中,漏电流的大小决定样品能否正常极化^[1]. 图 3 是漏电流密度随时间的演化过程,其中实线是根据我们的模型预测的结果,而虚线是实验结果,极化电压均为 10 kV/mm. 比较两种复合材料的理论结果可知,在暂态过程中, PZT/(VDF-TrFE) 复合材料的漏电流随时间下降得比 PZT/epoxy 复合材料迅速,到达稳态所需要的时间更短,而且漏电流更大,由 (15) 式可知,这两种复合材料极化行为

的较大差异来自基体的电导率差异,从而说明基体电导率对材料高压直流行为影响显著.再者,图中实验结果与理论预测基本一致,证实了基体电导率 σ_m 对 J 的影响正如上面理论分析结果.

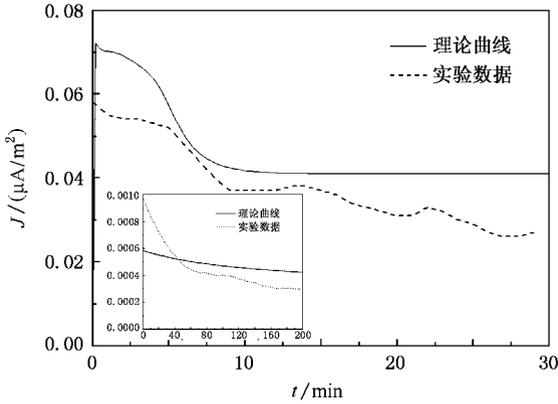


图3 $E_0 = 10 \text{ kV}$, $\Phi = 30\%$ 的 PZT/(VDF-TrFE) 复合材料的 J 随 t 的变化(插图为 PZT/epoxy 复合材料的 J 随 t 的变化)

图4中,曲线1、2和3是 PZT/epoxy 复合材料的漏导损耗 $\tan\delta_c$ 、介电损耗 $\tan\delta_p$ 和总的介质损耗 $\tan\delta$ 随基体电导率 σ_m 变化的理论预测结果,曲线4是 PZT/(VDF-TrFE) 复合材料的介质损耗 $\tan\delta$ 随基体电导率 σ_m 变化的理论结果.图示结果表明,增加基体的电导率 σ_m ,复合材料的漏导损耗 $\tan\delta_c$ 均线性增加,但是介电损耗 $\tan\delta_p$ 不变,它们共同的结果导致总的损耗 $\tan\delta$ 也线性增加.产生这种现象的原因可由(16)式得到解释.随基体电导率增加,复合材料的总电导率增加,而复合材料的介电常数不变,因此漏导损耗 $\tan\delta_c$ 增加而介电损耗 $\tan\delta_p$ 不变.图4中,●和★分别为 PZT/epoxy 和 PZT/(VDF-TrFE) 复合材料在 1 kHz 频率下得到的实际介质损耗,其中 PZT/(VDF-TrFE) 复合材料的介质损耗远高于 PZT/epoxy 的介质损耗,而且实验结果与理论预测值也比较一致,说明了基体电导率是影响介质损耗的重要因素.

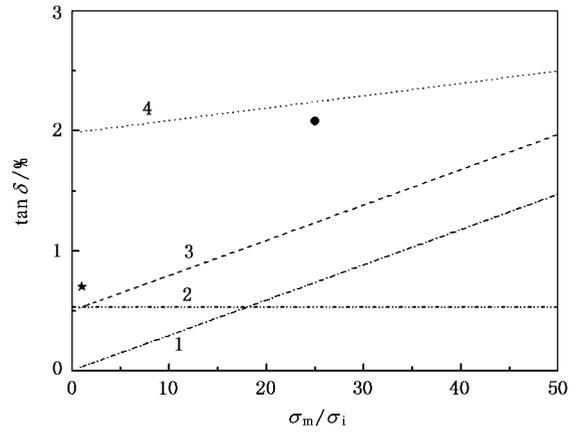


图4 PZT/epoxy 复合材料(曲线1、2、3)和 PZT/(VDF-TrFE) 复合材料(曲线4)的 $\tan\delta_c$ 、 $\tan\delta_p$ 及 $\tan\delta$ 随 σ_m 的变化

5. 结 论

考虑铁电复合材料极化处理过程中的真实情况,作者建立了一个直流高压极化模型.针对作者制备的 PZT/epoxy 和 PZT/(VDF-TrFE) 两种复合材料,从理论和实验两方面分析了基体的电导率对极化过程中极化强度、界面电流密度的影响以及损耗的影响,得到如下结论:

1. 基体电导率对极化行为有显著影响,一方面,提高基体电导率可以明显缩短极化时间,提高陶瓷相的极化强度,从而提高复合材料的整体性能,另一方面,基体电导率的提高导致暂态过程漏电流密度迅速下降,稳态的漏电流密度显著增加,且漏导损耗也显著增加,从而总的介质损耗增加,这不利于材料的极化处理及实际应用.因此,在实际材料设计中,需要综合考虑基体电导率的利弊,选择合适的基体.

2. 实验测试的极化行为(包括极化强度随极化电压的变化、漏电流密度随时间的变化等)及介质损耗与理论预测一致,因此作者提出的直流高压极化模型对实际材料设计及极化工艺的控制有启示意义.

感谢华中科技大学分析测试中心对本文工作的支持.

- [1] Ng K L , Wa H L , Choy C L 2000 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **47** 1308
- [2] Zhang L Y , Yao X 1991 *Dielectric Physics* (Xi 'an : Xi 'an Jiaotong University Press) p128—134 (in Chinese) [张良莹、姚 熹 1991 电介质物理 (西安 : 西安交通大学出版社) 第 128—134 页]
- [3] Xu X R , Chen W , Zhou J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4292 (in Chinese) [徐信任、陈 文、周 静 2006 物理学报 **55** 4292]
- [4] Or Y T , Wong C K 2003 *J. Appl. Phys.* **94** 3319
- [5] Zhang L Y , Yao X 1991 *Dielectric Physics* (Xi 'an : Xi 'an Jiaotong University Press) p206—209 (in Chinese) [张良莹、姚 熹 1991 电介质物理 (西安 : 西安交通大学出版社) 第 206—209 页]
- [6] Shi Z , Nan C W 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2766 (in Chinese) [施展、南策文 2004 物理学报 **53** 2766]
- [7] Nan C W , Chen X Z 1987 *Acta Phys. Sin.* **36** 511 (in Chinese) [南策文、陈新政 1987 物理学报 **36** 511]
- [8] Wong C K , Shin F G 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 064111
- [9] Zhang D M , Wei N , Yang F X , Han X Y , Zhong Z C , Zhen K Y 2006 *J. Phys. D : Appl. Phys.* **39** 1963
- [10] Wong C K , Poon Y M , Shin F G 2001 *J. Appl. Phys.* **90** 4690
- [11] Zhang D M , Yang F X , Zhong Z C , Wei N , Li Z H , Han X Y , Zhen K Y , Jiang S L. 2005 *J. Appl. Phys.* **98** 036103
- [12] Miller S L , Schwank J R , Nasby R D , Rodgers M S 2001 *J. Appl. Phys.* **70** 2849
- [13] Yang F X , Zhang D M , Yu B M , Zheng K Y , Li Z H 2003 *J. Appl. Phys.* **94** 2553

The influence of the matrix electrical conductivity on the dc poling behaviors and the loss of 0-3 ferroelectric composites *

Yang Feng-Xia^{1)†} Zhang Duan-Ming¹⁾ Deng Zong-Wei¹⁾ Jiang Sheng-Lin²⁾ Xu Jie¹⁾ Li Shu-Dan¹⁾

1) *Department of Physics, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China*

2) *Department of Electrics, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China*

(Received 29 September 2007 ; revised manuscript received 7 November 2007)

Abstract

A dc poling model is developed for the 0-3 ferroelectric composite by employing Laplace equation, combined with certain boundary conditions and taken account of the initial conditions of the polymer/ferroelectric ceramic interfacial charges. Two kinds of 0-3 composites with different matrixes, namely the PZT/epoxy and PZT/(VDF-TrFE) composites, were prepared. The influences of matrix electrical conductivity on the poling behaviors were studied experimentally and theoretically. The results showed that the experimental dates are fitted well with the theoretical results. With increased electric conductivity of the matrix, the poling time is shortened, and the polarization of ferroelectric ceramic and the total electric properties of composites are improved. However, the leakage current and dielectric loss are increased, too.

Keywords: ferroelectric composite, electric conductivity, polarization, dielectric loss

PACC: 7780, 7700, 7730, 7740

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10675048) and the Natural Science Foundation of Huazhong University of Science & Technology (Grant No. 0101012103).

† E-mail : yangsunny3445@163.com