

多场耦合作用下光热敏感介电凝胶的力电耦合变形行为

颜慧贤^{1,2*}, 苏恒迪³, 林 伟¹

(1. 三明学院机电工程学院, 三明 365004; 2. 装备智能控制福建省高校重点实验室, 三明 365004;
3. 河南农业大学信息与管理科学学院, 郑州 450002)

摘要:介电弹性体在电场作用下将产生形变, 为获得高的变形能, 需对介电弹性体施以较强的电场, 而强电场的施加可能诱发力电耦合失稳导致失效。针对光热敏感介电凝胶力电耦合变形行为, 基于热力学和连续介质力学理论建立力电耦合变形模型, 分析了光强、温度以及预拉伸对光热敏感介电凝胶力电耦合变形行为的影响, 结果表明: 无预拉伸时, 随着电场强度的增大, 光热敏感介电凝胶最终发生力电失稳, 光强越小、温度越低发生力电失稳时的临界电压越高; 预拉伸可显著改善力电稳定性, 施加等双轴预拉伸后, 凝胶厚度方向的伸长率显著变小, 电场强度随电位移增大而线性增大, 未出现力电失稳现象。

关键词:光热敏感; 介电凝胶; 耦合行为; 预拉伸; 力电失稳

光热敏感介电凝胶是具有光、热、电响应性的智能材料, 能对电场、光强、温度的变化作出响应而发生体积和形状的改变^[1, 2]。此外, 光热敏感介电凝胶还具有质轻价廉、响应快等优点, 因此在微机械、人工肌肉和仿生机器人等领域具有广泛的应用前景^[3]。

为了得到较高的变形能, 往往需对介电弹性体施加较强的电场, 而强电场的施加又常诱发力电失稳^[4]。针对介电弹性体的力电耦合变形与失稳问题, 国内外学者开展了相关研究。Zhao 等^[5]用变分法建立介电凝胶力电耦合模型, 用 Hessian 矩阵判定系统稳定性, 研究了介电凝胶在溶液中的拉伸与极化行为。基于 Hessian 矩阵, Diaz-Calleja 等^[6]建立区分介电弹性体稳定/非稳定区域的方法。Zhu 等^[7]研究了预拉伸和应变硬化对管状介电促动器力电耦合稳定性的影响。盛俊杰等^[8]实验研究了温度对丙烯酸系列介电弹性体力电耦合行为的影响, 并建立了与实验结果定性吻合的粘弹性力电耦合模型。梵亚玲等^[9]利用 ABAQUS 计算了不同等双轴预拉伸条件下的介电弹性驱动器的极限电致应变和稳态工作域。方康等^[10]给出了球膜型介电弹性体的失稳判据。赵嘉琪^[11]研究了环向预拉伸对管状介电膜-弹簧系统失效极限的影响。

为分析光强、温度以及预拉伸对光热敏感介电凝胶在电场激励下的力电耦合变形行为的影响, 本文基于热力学和连续介质力学理论, 构建了光热敏感介电凝胶力电耦合变形本构方程, 给出了多场耦合作用时的光热敏感介电凝胶自由能函数, 并基于此分析了光强、温度和预拉伸等因素对光热敏感介电凝胶力电耦合变形行为和力电稳定性的影响。

1 理论和模型

1.1 多场耦合作用时光热敏感介电凝胶平衡条件

将光热敏感介电凝胶夹于两柔性电极层之间构成三明治结构, 随后将该结构浸入溶液并置于电场和光辐射场中。在化学场、光辐射场以及电场的耦合作用下, 光热敏感介电凝胶将溶胀变形直至平衡。由于凝胶的溶胀变形, 初始态时(凝胶网络内无溶剂时的干态)凝胶网络内坐标为 X 的点在时刻 t 移到 x ,

10.14028/j.cnki.1003-3726.2020.02.005

收稿: 2019-06-24; 修回: 2019-11-28;

基金项目: 国家自然科学基金项目(11502131), 福建省自然科学基金项目(2016J05019), 福建省高校杰出青年科研人才培养计划项目([2016] 23);

* 通讯联系人: 颜慧贤, 博士, 副教授, 研究方向为智能材料力学性能分析。E-mail: yanhx1982@126.com.

那么凝胶的变形梯度 F_{iK} 可表示为:

$$F_{iK} = \frac{\partial x_i}{\partial X_K}. \quad (1)$$

以 C_s 和 C_p 表示参考态时凝胶内溶剂和光子的浓度, μ_s 和 μ_p 为其相应的化学势。以 B_i 和 T_i 表示作用于凝胶单位体积和单位表面积的法向力。以 $\tilde{E}$ 和 $\tilde{D}$ 表示作用于凝胶的电场强度和电位移。由平衡态热力学理论可知:凝胶平衡时其自由能 W 的变化等于外场(即:电场、力场、化学场和光辐射)所做的功^[12, 13], 因此有:

$$\int \delta W dV = \int B_i \delta x_i dV + \int T_i \delta x_i dA + \mu_s \int \delta C_s dV + \mu_p \int \delta C_p dV + \tilde{E} \int \delta \tilde{D} dV, \quad (2)$$

其中, dV 和 dA 分别为凝胶在参考构型时的体元和面元。

在特定温度 T 时,凝胶自由能 W 是变形梯度 F , 溶剂和光子的浓度 C_s 和 C_p 以及电位移 $\tilde{D}$ 的函数, 即:

$$W = W(F, C_s, C_p, \tilde{D}). \quad (3)$$

根据链式法则,由式(3)可得:

$$\delta W = \frac{\partial W}{\partial F_{iK}} \delta F_{iK} + \frac{\partial W}{\partial C_s} \delta C_s + \frac{\partial W}{\partial C_p} \delta C_p + \frac{\partial W}{\partial \tilde{D}} \delta \tilde{D}. \quad (4)$$

将式(4)代入式(2)式并利用散度理论,可将式(2)的平衡条件改写为:

$$\int \left[\left(\frac{\partial W}{\partial F_{iK}} - s_{iK} \right) \delta F_{iK} + \left(\frac{\partial W}{\partial C_s} - \mu_s \right) \delta C_s + \left(\frac{\partial W}{\partial C_p} - \mu_p \right) \delta C_p + \left(\frac{\partial W}{\partial \tilde{D}} - \tilde{E} \right) \delta \tilde{D} \right] dV = 0. \quad (5)$$

式(5)对任何的 δC_s , δC_p 和 $\delta \tilde{D}$ 均成立,可得:

$$\mu_s = \frac{\partial W(F, C_s, C_p, \tilde{D})}{\partial C_s}. \quad (6)$$

$$\mu_p = \frac{\partial W(F, C_s, C_p, \tilde{D})}{\partial C_p}. \quad (7)$$

$$\tilde{E} = \frac{\partial W(F, C_s, C_p, \tilde{D})}{\partial \tilde{D}}. \quad (8)$$

利用勒让德变换引入新自由能函数 $\hat{W}$:

$$\hat{W} = W - \mu_s C_s - \mu_p C_p - \tilde{E} \tilde{D}. \quad (9)$$

将该自由能函数代入方程(5),平衡条件可进一步改写为:

$$\int \delta \hat{W} dV = \int B_i \delta x_i dV + \int T_i \delta x_i dA. \quad (10)$$

可见,通过勒让德变换后得到的光热敏感介电凝胶的平衡方程与超弹性材料的平衡方程在形式上是一致的。因此,参考态时光热敏感介电凝胶的应力 s_{iK} 为:

$$s_{iK} = \frac{\partial \hat{W}}{\partial F_{iK}}. \quad (11)$$

1.2 光热敏感介电凝胶自由能

光热敏感介电凝胶总自由能可表示为弹性自由能 W_{el} 、混合自由能 W_{mix} 、光辐射能 W_{pho} 以及极化能 W_{pol} 之和^[13], 即:

$$W = W_{el} + W_{mix} + W_{pho} + W_{pol}. \quad (12)$$

当凝胶发生拉压变形时,上述四个自由能函数分别为:

弹性自由能 $W_{el}^{[5]}$:

$$W_{el}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \frac{1}{2} NkT [\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3 - 2\ln(\lambda_1\lambda_2\lambda_3)], \quad (13)$$

其中, N 为参考态时的凝胶网络的交联密度, k 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度, λ_1 , λ_2 和 λ_3 为三个主伸长比。

混合自由能 $W_{mix}^{[14]}$:

$$W_{mix} = \frac{kT}{v_s} [(\lambda_1\lambda_2\lambda_3) - 1] \left[-\frac{1}{(\lambda_1\lambda_2\lambda_3)} - \frac{1}{2(\lambda_1\lambda_2\lambda_3)^2} - \frac{1}{3(\lambda_1\lambda_2\lambda_3)^3} + \frac{\chi}{(\lambda_1\lambda_2\lambda_3)} \right], \quad (14)$$

其中 v_s 为单个溶剂分子的体积, χ 为 Flory-Huggins 参数, 其满足^[14]:

$$\chi = \chi_0 + \chi_1\phi, \quad (15)$$

而 χ_0 和 χ_1 分别为:

$$\chi_0 = A_0 + B_0T, \quad \chi_1 = A_1 + B_1T, \quad (16)$$

其中, $\phi = 1/(\lambda_1\lambda_2\lambda_3)$ 为凝胶网络体积分数; $T = T_0 + \Delta T = T_0 + \alpha I_0\phi$, T_0 为环境初始温度, I_0 为环境初始光强, ΔT 是由于光辐射而升高的温度, α 为比例常数; A_0 , A_1 , B_0 和 B_1 为凝胶材料参数。

光辐射自由能为^[13]:

$$W_{pol} = C_p \left(hf + kT \ln \left(\frac{C_p}{C_{g,o}} \right) \right), \quad (17)$$

其中, $C_{g,o}$ 为光吸收纳米粒子在基态时的密度, C_p 是光子的浓度:

$$C_p = \left[\frac{c^w}{(\lambda_1\lambda_2\lambda_3)} + \frac{c^n - c^w}{(\lambda_1\lambda_2\lambda_3)^2} \right] \frac{\alpha I_0}{hf}. \quad (18)$$

而 c^w 和 c^n 分别为溶剂和凝胶的体积比热容, hf 为光子的能量。

极化自由能^[5]:

$$W_{pol} = \frac{\lambda_3 \tilde{D}^2}{2\varepsilon\lambda_1\lambda_2}. \quad (19)$$

其中 ε 为凝胶的介电常数。

1.3 力-电-光耦合作用下的光热敏感介电凝胶本构方程

凝胶分子和溶剂分子在载荷作用下其体积几乎不变。因此, 溶胀凝胶的总体积近似等于凝胶网络体积与其吸收的溶剂体积之和, 即^[15]:

$$1 + vC_s = \lambda_1\lambda_2\lambda_3. \quad (20)$$

将上述自由能函数代入式(6)~式(9)并结合式(20), 可以得到经勒让德变换后的光热敏感介电凝胶自由能函数 $\hat{W}$, 将该自由能函数代入式(11), 那么可得发生拉压变形的光热敏感介电凝胶的状态方程, 即:

$$s_1 = NkT(\lambda_1 - \lambda_1^{-1}) + \frac{kT}{v_s} \left(\lambda_2\lambda_3 - \frac{1}{\lambda_1} \right) G_1(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) + kT \frac{\alpha I_0}{hf\lambda_1} G_2(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) - \frac{\mu_s}{v} (\lambda_2\lambda_3) - \frac{\lambda_3 \tilde{D}^2}{\varepsilon\lambda_1^2\lambda_2}. \quad (21)$$

$$s_2 = NkT(\lambda_2 - \lambda_2^{-1}) + \frac{kT}{v_s} \left(\lambda_1\lambda_3 - \frac{1}{\lambda_2} \right) G_1(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) + kT \frac{\alpha I_0}{hf\lambda_2} G_2(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) - \frac{\mu_s}{v} (\lambda_1\lambda_3) - \frac{\lambda_3 \tilde{D}^2}{\varepsilon\lambda_1\lambda_2^2}. \quad (22)$$

$$s_3 = NkT(\lambda_3 - \lambda_3^{-1}) + \frac{kT}{v_s} \left(\lambda_1\lambda_2 - \frac{1}{\lambda_3} \right) G_1(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) +$$

$$kT \frac{\alpha I_0}{h f \lambda_3} G_2(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) - \frac{\mu_s}{v} (\lambda_1 \lambda_2) + \frac{\tilde{D}^2}{\epsilon \lambda_1 \lambda_2}.$$

(23)

$$\tilde{E} = \frac{\lambda_3 \tilde{D}}{\epsilon \lambda_1 \lambda_2}.$$

(24)

其中, $G_1(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ 和 $G_2(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ 分别满足:

$$G_1(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \left(-\frac{1}{2(\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3)} - \frac{1}{3(\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3)^2} + \frac{\chi_0 - \chi_1}{(\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3)} + \frac{2\chi_1}{(\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3)^2} \right).$$

(25)

$$G_2(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \left(\frac{2(c^n - c^w)}{(\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3)^2} + \frac{c^w}{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3} \right).$$

(26)

2 结果与讨论

2.1 无预拉伸时的变形行为

将层状光热敏感介电膜夹于两柔性电极层之间并浸入溶液,沿厚度方向施加电场后使其溶胀至平衡。由于电场的影响,膜厚度方向伸长率 λ_3 与面内伸长率 λ_1 和 λ_2 不相等, $\lambda_1 = \lambda_2 \neq \lambda_3$ 。凝胶膜面内方向与厚度方向无应力,由式(21)和式(23)可得:

$$NkT(\lambda_1 - \lambda_1^{-1}) + \frac{kT}{v_s} \left(\lambda_2 \lambda_3 - \frac{1}{\lambda_1} \right) G_1(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) + kT \frac{\alpha I_0}{h f \lambda_1} G_2(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) - \frac{\mu_s}{v} (\lambda_2 \lambda_3) - \frac{\lambda_3 \tilde{D}^2}{\epsilon \lambda_1^2 \lambda_2} = 0.$$

(27)

$$NkT(\lambda_3 - \lambda_3^{-1}) + \frac{kT}{v_s} \left(\lambda_1 \lambda_2 - \frac{1}{\lambda_3} \right) G_1(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) + kT \frac{\alpha I_0}{h f \lambda_3} G_2(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) - \frac{\mu_s}{v} (\lambda_1 \lambda_2) + \frac{\tilde{D}^2}{\epsilon \lambda_1 \lambda_2} = 0.$$

(28)

式(27)和式(28)联立可求得在一定温度、光强和电位移 $\tilde{D}$ 条件时的凝胶面内伸长率 λ_1 和沿厚度方向伸长率 λ_3 。为便于分析,在后面的计算中将参考态时的电场强度和电位移分别用 $T_0 = T_* = 300\text{K}$ 时的 $\sqrt{kT_*/\epsilon v}$ 和 $\sqrt{\epsilon kT_*/v}$ 标准归一化处理。

表 1 材料参数与物理常数
Table 1 Material parameters and physical constants

材料参数与物理常数 ^[15]			
热敏凝胶网络参数 A_0	-12.947	入射光波长 f/nm	488
热敏凝胶网络参数 B_0/K^{-1}	0.04496	普兰克常数 $h/(\text{m}^2 \text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	6.626×10^{-34}
热敏凝胶网络参数 A_1	17.92	单个溶剂分子体积 v/m^3	10^{-28}
热敏凝胶网络参数 B_1/K^{-1}	-0.0569	聚合物网络体积比热容 $c_n/(\text{Jm}^{-3} \cdot \text{K}^{-1})$	4.18×10^6
光热转化系数 $\alpha/(\text{Km}^2 \cdot \text{W}^{-1})$	0.6	水的体积比热容 $c_w/(\text{Jm}^{-3} \cdot \text{K}^{-1})$	2.4×10^7

图 1 和图 2 给出了不同光强、温度条件下光热敏感介电凝胶沿厚度方向伸长率 λ_3 与电位移的关系曲线。可见,无预拉伸时,沿厚度方向施加电场的作用时凝胶被压缩,电位移越大压缩量越大,厚度方向的伸长率就越小。由图 1 和图 2 还可以看出温度越高,光强越强时,凝胶其厚度方向的伸长率越小。这是因为聚(N-异丙基丙烯酰胺)(PNIPAM)温敏性凝胶其溶胀率随温度升高而降低,因而温度越高其厚度方向的伸长率也越小。而光强越强,因光热转化而升高的温度值越大,那么凝胶的溶胀率则越小,因此,沿厚度方向的伸长率也越小。

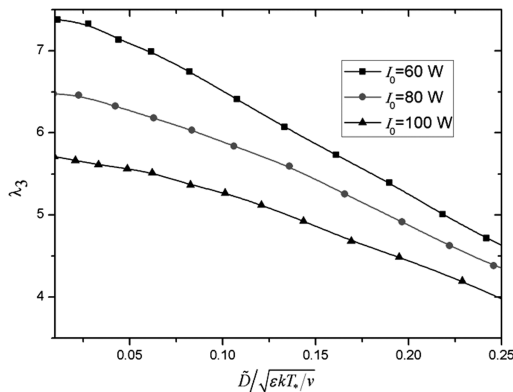


图 1 不同光强条件下,厚度方向伸长率与电位移关系曲线 ($T_0=298\text{K}$)

Figure 1 Relation curves between the elongation in the thickness direction and the electric displacement under different light intensity ($T_0=298\text{K}$)

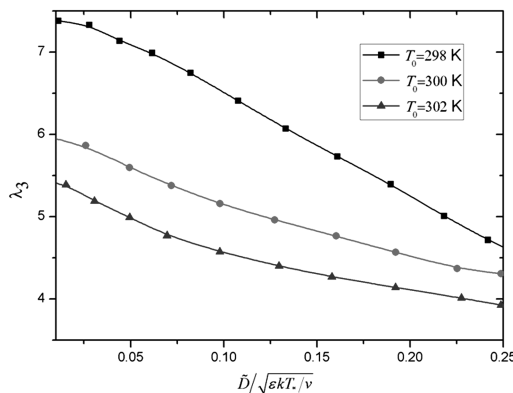


图 2 不同温度条件下,厚度方向伸长率与电位移关系曲线 ($I_0=60\text{W}$)

Figure 2 Relation curves between the elongation in the thickness direction and the electric displacement under different temperature ($I_0=60\text{W}$)

图 3 和图 4 分别给出了不同光强和温度条件下电场强度与电位移的关系曲线。可见,无预拉伸时,电场强度随电位移的增大而增大直到某一临界值,此后电场强度随电位移的增大而减小,出现力电失稳。这是因为当凝胶两表面电势差足够大时将使凝胶厚度显著变薄,从而在凝胶内诱发一很大的电场,因而只需更低的电压即可得到更多的电荷。图中打叉点对应于峰值电压,可见,光强越强,温度越低时,临界电压越高。

2.2 等双轴预拉伸的影响

对光热敏感介电凝胶膜施加等双轴预拉伸,维持面内拉伸 $\lambda_1 = \lambda_2$ 不变。凝胶膜厚度方向无应力,由式(23)可得:

$$NkT(\lambda_3 - \lambda_3^{-1}) + \frac{kT}{v_s} \left(\lambda_1 \lambda_2 - \frac{1}{\lambda_3} \right) G_1(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) + kT \frac{\alpha I_0}{h f \lambda_3} G_2(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) - \frac{\mu_s}{v} (\lambda_1 \lambda_2) + \frac{\tilde{D}^2}{\epsilon \lambda_1 \lambda_2} = 0, \quad (30)$$

其中 $T = T_0 + \alpha I_0 / \lambda_1^2 \lambda_3$ 。

图 5 和图 6 给出了预拉伸 $\lambda_1 = \lambda_2 = 1.5$ 时不同光强、温度条件下光热敏感介电凝胶厚度方向伸长率 λ_3 与电位移的关系曲线。可见,施加了等双轴预拉伸后,凝胶厚度方向的伸长率显著变小,随着电位移的

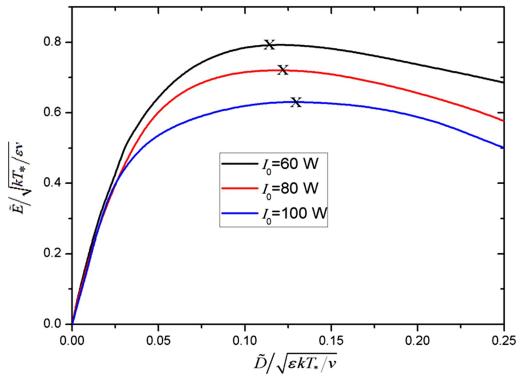


图 3 不同光强条件下,电场强度与电位移关系曲线($T_0=298\text{K}$)

Figure 3 Relation curves between the nominal electric field strength and the electric displacement under different light intensity ($T_0=298\text{K}$)

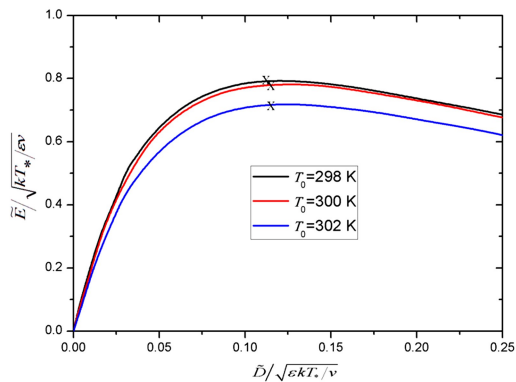


图 4 不同温度条件下,电场强度与电位移关系曲线($I_0=60\text{W}$)

Figure 4 Relation curves between the nominal electric field strength and the electric displacement under different temperature ($I_0=60\text{W}$)

增大,凝胶厚度变小。

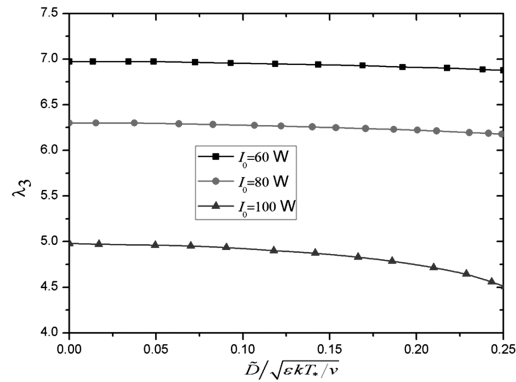


图 5 等双轴预拉伸 $\lambda_1 = \lambda_2 = 1.5$ 时,不同光强条件下凝胶厚度方向伸长率与电位移关系曲线($T_0=298\text{K}$)

Figure 5 Relationship between the elongation in the thickness direction and the electric displacement at several values of the light intensity for a gel with $\lambda_1 = \lambda_2 = 1.5$ ($T_0=298\text{K}$)

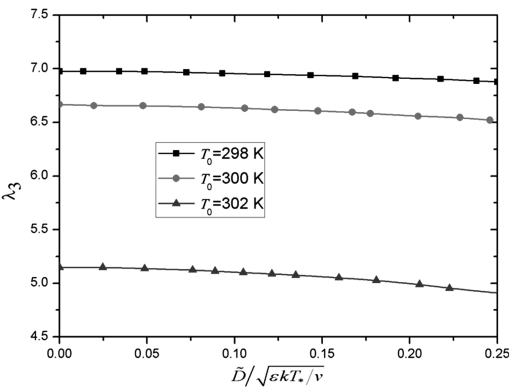


图 6 等双轴预拉伸 $\lambda_1 = \lambda_2 = 1.5$ 时,不同温度条件下凝胶厚度方向伸长率与电位移关系曲线 ($I_0=60\text{W}$)

Figure 6 Relationship between the elongation in the thickness direction and the electric displacement at several values of the temperature for a gel with $\lambda_1 = \lambda_2 = 1.5$ ($I_0=60\text{W}$)

图 7 和图 8 给出了等双轴预拉伸 $\lambda_1 = \lambda_2 = 1.5$, 不同光强和温度条件下凝胶的电场强度与电位移的关系曲线。可见,预拉伸对抑制光热敏感介电凝胶力电失稳有积极作用。施加预拉伸后,电场强度随电位移的增大而线性增大,未发现有力电失稳发生。

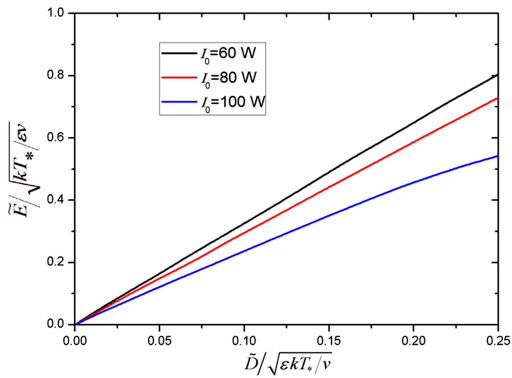


图 7 等双轴预拉伸 $\lambda_1 = \lambda_2 = 1.5$ 时,不同光强条件下电场强度与电位移关系曲线 ($T_0=298\text{K}$)

Figure 7 Relationship between the nominal electric field strength and the electric displacement at several values of the light intensity for a gel with biaxial pre-stretch $\lambda_1 = \lambda_2 = 1.5$ ($T_0=298\text{K}$)

3 结论

本文结合光热敏感凝胶大变形理论和介电高聚物理论构造了光热敏感介电凝胶变形模型,利用该模型分析了光强、温度以及预拉伸对光热敏感介电凝胶力电耦合变形与力电失稳的影响,主要结论如下:

- (1)温度越高,光强越强时,凝胶其厚度方向的伸长率越小;
- (2)无预拉伸的情况下,电场强度随电位移的增大而增大直到某一临界值,此后电场强度随电位移的增大而减小,出现力电失稳。光强越强,温度越低时,出现力电失稳时的临界电压越高;
- (3)施加了等双轴预拉伸后,凝胶厚度方向的伸长率显著变小,随着电位移的增大,凝胶厚度变小。可见,预拉伸对抑制光热敏感介电凝胶力电失稳有积极作用。施加预拉伸后,电场强度随电位移的增大而线性增大,未发现有力电失稳发生。

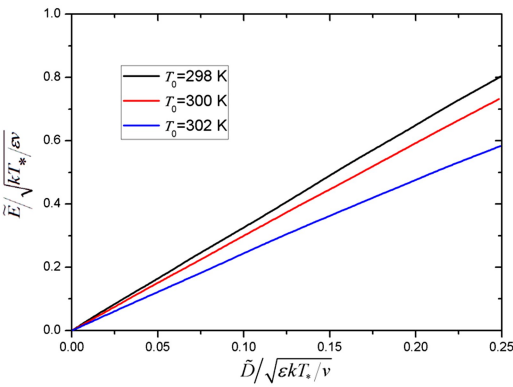


图 8 等双轴预拉伸 $\lambda_1 = \lambda_2 = 1.5$ 时,不同温度条件下电场强度与电位移关系曲线 ($I_0=60\text{W}$)

Figure 8 Relationship between the nominal electric field strength and the electric displacement at several values of the temperature for a gel with biaxial pre-stretch $\lambda_1 = \lambda_2 = 1.5$ ($I_0=60\text{W}$)

致谢 本文获国家自然科学基金青年项目(项目批准号:11502131),福建省自然科学基金项目(项目批准号:2016J05019),福建省高校杰出青年科研人才培育计划项目(项目批准号:[2016] 23)资助,在此表示感谢。

参考文献:

[1] Liu Z S, Toh W, Ng T Y. Int J Appl Mech, 2015, 7(5): 1530001.

[2] 锁志刚,曲绍兴. 力学进展,2011,41(6):730~750.

[3] Toh W, Ng T Y, Hu J Y, Liu Z S. Int J Solids Struct, 2014, 51(25):4440~4451.

[4] 刘立武, 李金嵘,吕雄飞, 李丰丰, 刘彦菊, 冷劲松. 中国科学: 技术科学, 2015, 45(5): 450~463.

[5] Zhao X H, Hong W, Suo Z G. Int J Solids Struct, 2008, 45(14/15):4021~4031.

[6] Díaz-Calleja R, Riande E, Sanchis M J. Appl Phys Lett, 2008,93(10): 101902.

[7] Zhu J, Stoyanov H, Kofod G, Suo Z G. J Appl Phys, 2010, 108(7):74113.

[8] 盛俊杰, 张玉庆, 李树勇, 刘磊, 陈花玲. 固体力学学报, 2015,36(2): 129~136.

[9] 樊亚玲, 杨宏亮. 金属功能材料,2016,23(2): 40~44.

[10] 方康, 金肖玲, 王永, 黄志龙. 固体力学学报, 2017,38(2): 146~156.

[11] 赵嘉琪. 管状介电薄膜弹簧系统的力学响应分析. 兰州:兰州理工大学工程力学系, 2016.

[12] Zhao X H, Suo Z G. Phys Rev Lett, 2010, 104(17): 178302.

[13] Toh W, Ng T Y, Hu J Y, Liu Z S. Int J Solids Struct, 2014, 51(25/26): 4440~4451.

[14] Mazaheri H, Baghani M, Naghdabadi R, Sohrabpour S. Smart Mater Struct, 2016, 25(8): 085034.

[15] 颜慧贤,张锐戈,张仁巍,张彦. 科学技术与工程, 2018, 18(28):176~181.

The Electric-mechanical Coupling Behavior of A Photo-thermal Sensitive Dielectric Gel under Coupling Multi-field Effect

YAN Hui-xian^{1,2*}, SU Heng-di³, LIN Wei¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Sanming University, Sanming 365004, China;

2. Key Laboratory of Equipment Intelligence Control of Fujian Province, Sanming 365004, China;

3. College of Information and Management Science, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: The dielectric elastomer will deform under the action of electric field. Strong electric field should be applied to the dielectric elastomer to obtain high deformation energy, which may lead to electric-mechanical instability. In this paper, the electric-mechanical coupling behavior of photo-thermal sensitive dielectric gel was studied. Based on the theory of thermodynamics and continuum mechanics, the electric-mechanical coupling deformation theory of photo-thermal sensitive dielectric gel was established, the effects of temperature, light intensity and pretension on the electric-mechanical coupling deformation behavior of photo-thermal sensitive dielectric gel were studied. The results show that: In the absence of pretension, the electric-mechanical instability will occur finally with the increase of electric field intensity, and the smaller the light intensity and the lower the temperature is, the higher the critical electric intensity is; Pretension can improve the electric-mechanical stability of photo-thermal sensitive dielectric gel. With equal biaxial pre-stretching, the extension rate in the direction of gel thickness decreases significantly, the nominal electric field strength increases linearly with the increase of nominal electric field.

Key words: Photo-thermal sensitive; Dielectric gel; Coupling behavior; Prestretching; Electric-mechanical instability