

研究简报

膜-基结构光热敏感凝胶膜起皱临界波长与临界应力分析

颜慧贤^{1,2*}, 魏茂金^{1,2}, 姚豪杰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)

摘要:粘附于弹性基底的光热敏感凝胶薄膜-基底结构广泛应用于微机械、生物传感器和促动器等领域。当光强或温度变化时,光热响应凝胶膜发生溶胀,由于基底的限制作用,凝胶膜中存在的压应力可能使凝胶膜发生起皱失稳。基于光热敏感凝胶溶胀大变形理论与冯卡门几何非线性薄板理论,本文对膜-基结构光热敏感凝胶膜起皱失稳机理进行分析,计算了不同光强、温度、溶剂化学势及刚度系数条件下凝胶膜起皱的临界波长和临界应力。结果表明:当环境的光强和温度相同时,溶剂的化学势越大,光热敏感凝胶膜起皱的临界应力越大;当溶剂的化学势相同时,环境的光强越强,温度越高,临界应力越大;在环境温度和光强相同的情况下,光热敏感凝胶膜-基底结构的刚度系数越小,起皱时的临界波长越大;在刚度系数相同的情况下,环境温度越低,光强越弱,起皱临界波长越小。

关键词:光热敏感凝胶; 薄膜-基底结构; 起皱; 临界波长; 临界应力

膜状材料由于其具有诸多异于块状材料的特殊物理、化学性能,吸引了众多学者的注意。其中,光热敏感凝胶膜作为能够对外界光强和温度的变化作出响应而产生体积和形状改变的智能薄膜材料,广泛应用于组织工程、药物控释、生物传感和器官修复等领域,是膜科学领域研究热点之一^[1,2]。

实际应用中,薄膜-基底结构是最为常见的结构模型之一^[3]。光强或温度变化时,光热敏感凝胶膜溶胀或收缩。由于基底的限制作用,凝胶膜中存在的拉应力或压应力可能使得凝胶膜开裂或起皱,从而影响材料的正常使用。薄膜的起皱失稳问题吸引了国内外众多研究者的注意。基于非线性冯卡门板理论,Huang^[4]对固定于粘弹性基底的弹性膜的动态起皱失稳机理进行了分析;Sulta等^[5]利用线弹性理论研究了粘附于柔性基底的凝胶膜的起皱失稳特征;Kang等^[6]在凝胶溶胀大变形理论的基础上结合线性微扰理论对凝胶膜受限溶胀稳定性进行了分析;Liu等^[7]利用冯卡门几何非线性薄板理论求出了粘附于弹性基底的中性凝胶膜起皱失稳临界波长和临界应力的解析解。黄萧等^[8]对具有周期微结构基底上的薄膜失稳问题进行了分析;张校维等^[9]研究了高分子链物理缠结对凝胶膜起皱失稳的影响;黄春阳等^[10]研究了粘附于可压缩基底的超弹性薄膜的表面失稳问题,计算了基底泊松比对薄膜表面失稳的影响。

上述关于薄膜表面失稳问题的研究深化了人们对薄膜起皱失稳机理的理解。然而,已有研究主要局限于弹性薄膜或中性凝胶膜,较少涉及智能凝胶膜的起皱失稳。本文以光热敏感智能凝胶膜为研究对象,研究膜-基结构光热敏感凝胶膜的起皱失稳行为,计算不同光强、温度、溶剂化学势和基底材料泊松比等参数条件下起皱的临界波长和临界应力,具有重要的理论和工程实际意义。

1 光热敏感凝胶溶胀变形理论

光热敏感凝胶膜粘附于弹性基底构成膜-基结构,当溶液化学势或外界光强、温度变化时光热敏感凝

10.14028/j.cnki.1003-3726.2019.05.007

收稿:2018-08-04;修回:2019-01-30;

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

* 通讯联系人:颜慧贤,博士,副教授,主要从事软物质力学的研究。E-mail: yanhx1982@126.com.

胶膜将溶胀或收缩直至新的平衡。由于基底的限制作用,凝胶膜中存在的拉应力或压应力可能使得凝胶膜开裂或起皱。Toh 等^[11]基于平衡态热力学和连续介质力学理论导出了光热敏感凝胶溶胀变形理论,该理论为分析光热敏感凝胶形貌失稳问题奠定了基础。本节对该理论作一简要介绍。

1.1 热力学平衡方程

光热敏感凝胶浸入溶液并受光辐射作用时,作用于凝胶上的载荷有三类:机械载荷、溶剂作用以及光热反应作用。平衡时,系统自由能的变化等于这三种载荷所做的功,即^[11]:

$$\int \delta W dV = \int B_i \delta x_i dV + \int T_i \delta x_i dA + \mu_s \int \delta C_s dV + \mu_p \int \delta C_p dV \quad (1)$$

式中, W 为凝胶自由能密度, C_s 和 μ_s 分别为溶剂在参考构型(初始构型)时的浓度和电化学势, C_p 和 μ_p 为辐射光子在参考构型时的浓度和电化学势, B_i 和 T_i 为凝胶网络单位体积和单位面积所受的外力, dV 和 dA 分别为凝胶在参考构型时的体元和面元。

利用勒让德变换方法引入另一个自由能函数 $\dot{W}(F, \mu)$:

$$\dot{W}(F, \mu) = W(F, C) - \mu_s C_s - \mu_p C_p \quad (2)$$

将式(2)代入式(1),可得与超弹性固体平衡方程的形式一致的光热敏感凝胶平衡方程,即:

$$\int \delta \dot{W} dV = \int B_i \delta x_i dV + \int T_i \delta x_i dA \quad (3)$$

1.2 限制条件

光热敏感凝胶溶胀变形时,凝胶承受的荷载不足以使凝胶组分自身的体积和溶剂分子的体积发生显著变化,因此可以认为是不可压的,即:凝胶的体积等于凝胶网络的体积与进入凝胶网络内的溶剂分子体积之和:

$$1 + vC_s = J = \det F \quad (4)$$

式中, v 表示单个溶剂分子的体积, $J = \det F$ 为变形梯度第三不变量。

光热转化导致凝胶内温度升高,根据能量守恒定律,可得^[11]:

$$C_p = \left[\frac{c^w}{J} + \frac{c^n - c^w}{J^2} \right] \frac{\alpha I}{hf} \quad (5)$$

式(5)中 hf 为一个辐射光子的能量, α 为光热转化比例常数, I 是入射光光强, c^w 和 c^n 分别为水和凝胶网络的体积比热容。

1.3 自由能函数与本构方程

光热敏感凝胶自由能包含三部分:凝胶网络弹性自由能、网络与溶剂混合自由能以及光辐射自由能。Toh 等^[11]结合上述限制条件给出了光热敏感凝胶自由能的具体表达式,即:

$$\begin{aligned} \dot{W} = & \frac{1}{2} NkT [J^{\frac{2}{3}} \bar{I}_1 - 3 - 2\ln(J)] + \frac{kT}{v_s} (J - 1) \left[-\frac{1}{J} - \frac{1}{2J^2} - \frac{1}{3J^3} + \left(\frac{\chi_0}{J} + \frac{\chi_1}{J^2} \right) \right] \\ & - kT \frac{\alpha I}{hf} \left[\frac{c^w}{J} + \frac{c^n - c^w}{J^2} \right] - \mu_s \left(\frac{J - 1}{v} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

式中, N 为交联网链数密度, k 为玻尔兹曼常数, $\bar{I}_1$ 为右柯西-格林变形张量的第一不变量, χ_0 和 χ_1 分别满足:

$$\chi_0 = A_0 + B_0 T, \chi_1 = \varphi (A_1 + B_1 T) \quad (7)$$

式中, $\varphi = 1/(1 + vC_s)$ 为凝胶网络体积分数; $T = T_0 + \Delta T = T_0 + \alpha I \varphi$, T_0 为环境温度, ΔT 为光辐射引起的温度升高量; A_0 、 A_1 、 B_0 和 B_1 是与凝胶材料相关的参数, NkT 代表凝胶的剪切模量。

超弹性固体的本构关系为 $s_{iK} = \partial W / \partial F_{iK}$, 由于光热敏感凝胶平衡方程与超弹性固体平衡方程形式一致,因此将式(6)代入上式即可得光热敏感凝胶的本构方程:

$$s_{iK} = \frac{\partial W}{\partial F_{iK}} = NkT(F_{iK} - H_{iK}) + \frac{kT}{v_s} \left(-\frac{1}{2J^2} - \frac{1}{3J^3} - \frac{1}{J^4} + \frac{\chi_0 - \chi_1}{J^2} + \frac{2\chi_1}{J^3} \right) JH_{iK} \\ + kT \frac{\alpha I}{hf} \left[\frac{2(c^n - c^w)}{J^3} + \frac{c^w}{J^2} \right] JH_{iK} - \frac{\mu_s}{v} JH_{iK} \quad (8)$$

式中, s_{iK} 为参考构型时的应力, F_{iK} 为变形梯度, H_{iK} 为变形梯度逆矩阵的转置。

2 膜-基结构光热敏感凝胶膜起皱失稳

2.1 光热敏感凝胶膜增量模量

在一定的初始光强 I_0 、温度 T_0 、溶液化学势 μ_0 的条件下, 将光热敏感凝胶膜浸入溶液中使其自由溶胀直至平衡, 假设其平衡溶胀率为 λ_0 。随后将该凝胶膜粘附于弹性基底并改变环境条件(溶液化学势、温度、光强)使其继续溶胀。由于基底的限制, 凝胶面内溶胀受限, 面内伸长率维持不变, $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_0$, 并产生非零的等双轴应力 $s_1 = s_2$; 而在薄膜厚度方向, 凝胶未受限制将继续溶胀直至新的平衡。达到新的平衡时其厚度方向伸长率 $\lambda_3 = \lambda_0 \lambda$, 而应力 s_3 等于零。

由式(8)求得初始光强、温度和溶液化学势条件下的光热敏感凝胶自由溶胀率 λ_0 :

$$NkT_0 \left(\lambda_0 - \frac{1}{\lambda_0} \right) + \frac{kT_0}{v} \left[-\frac{1}{2\lambda_0^3} - \frac{1}{3\lambda_0^6} - \frac{1}{\lambda_0^9} + \frac{\chi_0 - \chi_1}{\lambda_0^3} + \frac{2\chi_1}{\lambda_0^6} \right] \frac{1}{\lambda_0} \\ + kT \frac{\alpha I_0}{hf} \left[\frac{2(c^n - c^w)}{\lambda_0^6} + \frac{c^w}{\lambda_0^3} \right] \frac{1}{\lambda_0} - \frac{\mu_0}{v} \lambda_0^2 = 0 \quad (9)$$

将预溶胀后的光热敏感凝胶膜粘附于弹性基底使面内伸长率保持不变, 改变环境条件后(光强、温度和溶液化学势分别为 I 、 T 和 μ_s), 凝胶膜在厚度方向将继续溶胀直至平衡, 而厚度方向应力为零。由式(8)可得:

$$NkT \left(\lambda_3 - \frac{1}{\lambda_3} \right) + \frac{kT}{v} \left[-\frac{1}{2\lambda_3 \lambda_0^2} - \frac{1}{3\lambda_3^2 \lambda_0^4} - \frac{1}{\lambda_3^3 \lambda_0^6} + \frac{\chi_0 - \chi_1}{\lambda_3 \lambda_0^2} + \frac{2\chi_1}{\lambda_3^2 \lambda_0^4} \right] \frac{1}{\lambda_3} \\ + kT \frac{\alpha I}{hf} \left[\frac{2(c^n - c^w)}{\lambda_3^2 \lambda_0^4} + \frac{c^w}{\lambda_3 \lambda_0^2} \right] \frac{1}{\lambda_3} - \frac{\mu_s}{v} \lambda_0^2 = 0 \quad (10)$$

式(10)给出了不同环境条件厚度方向伸长率 λ_3 所满足的关系式。

受基底限制作用, 面内溶胀率保持为 λ_0 , 并产生等双轴应力, 由式(8)得:

$$s_1 = NkT \left(\lambda_0 - \frac{1}{\lambda_0} \right) + \frac{kT}{v} \left[-\frac{1}{2\lambda_3 \lambda_0^2} - \frac{1}{3\lambda_3^2 \lambda_0^4} - \frac{1}{\lambda_3^3 \lambda_0^6} + \frac{\chi_0 - \chi_1}{\lambda_3 \lambda_0^2} + \frac{2\chi_1}{\lambda_3^2 \lambda_0^4} \right] \frac{1}{\lambda_0} \\ + kT \frac{\alpha I}{hf} \left[\frac{2(c^n - c^w)}{\lambda_3^2 \lambda_0^4} + \frac{c^w}{\lambda_3 \lambda_0^2} \right] \frac{1}{\lambda_0} - \frac{\mu_s}{v} \lambda_3 \lambda_0 = 0 \quad (11)$$

将式(10)、(11)联立整理得:

$$s_1 = NkT \left(\lambda_0 - \frac{\lambda_3^2}{\lambda_0} \right) \quad (12)$$

对于凝胶材料, 增量模量 $\tilde{E} = \partial s_1 / \partial \lambda_1$ 是描述其力学特性量的重要参数指标^[7]。将式(12)代入光热敏感凝胶增量模量的定义式, 得:

$$\tilde{E} = NkT \left(1 + \frac{\lambda_3^2}{\lambda_0^2} \right) = NkT (1 + \lambda^2) \quad (13)$$

式(13)与式(9)和(10)结合共同给出了膜-基结构光热敏感凝胶膜在不同预溶胀条件和环境条件下的增量模量表达式。

2.2 起皱临界波长与临界应力

如图1所示, 将预溶胀后的初始厚度为 h_0 的无限薄光热敏感凝胶膜粘附于弹性基底构成薄膜-基底

结构,假设凝胶膜和基底的宽度均为 b 。由于膜厚度远小于膜宽度,因此可假设凝胶溶胀处于平面应力状态。由于弹性基底的限制,凝胶膜的持续溶胀或收缩将引起凝胶膜起皱或开裂。设凝胶膜沿 x 方向起皱且 y 方向波形完全相同。光热凝胶膜起皱时失稳波长远大于其厚度,因此可用非线性冯卡门板理论研究光热敏感凝胶膜的起皱行为。

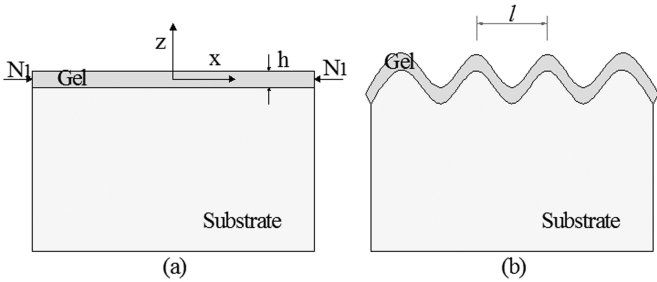


图 1 光热敏感凝胶膜-基底结构模型

(a)起皱前;(b)起皱后

Figure 1 Model of film-substrate structure of photo-thermal sensitive hydrogel

(a) before the wrinkle;(b) after the wrinkle

凝胶膜起皱时,设 z 轴方向的挠度为 w ,根据冯卡门非线性板理论,可得^[7]:

$$D \nabla^4 w - N_1 \nabla^2 w = -bq \tag{14}$$

式中 $D = \frac{\tilde{E}bh^3}{12}$, $N_1 = s_1bh$, $h = \lambda h_0$, q 为薄膜与弹性基底间的正应力。

凝胶膜起皱时,假设皱纹是波长为 l 的正弦波,那么有:

$$w = w_m \sin \frac{2\pi x}{l} \tag{15}$$

而应力 q 的表达式为^[7]:

$$q = \frac{2A}{l} w_m \sin \frac{2\pi x}{l} \tag{16}$$

式中, $A = \frac{2\pi E_s}{(3-\mu)(1+\mu)}$, 其中, E_s 和 μ 分别为弹性基底的杨氏模量和泊松比。

将式(13)–(16)联立,可求出凝胶膜在参考态时在 x 轴方向的压应力 s_1 ,即:

$$s_1 = \frac{4\pi^2 D l^2}{bh_0^5} - \frac{Al}{2\pi^2 h_0} \tag{17}$$

因此,可见,在参考构型时 x 轴方向的压应力 s_1 除了与凝胶的材料特性参数有关,还与失稳波长 l 相关。要得到光热敏感凝胶膜的临界失稳波长 l_{cr} ,只需令 $\partial s_1 / \partial l = 0$,即:

$$l_{cr} = \left(\frac{16\pi^4 D}{bA} \right)^{1/3} = \frac{2\pi^3 \lambda^3 NkT(1+\lambda^2)(3-\mu)(1+\mu)}{3E_s} \tag{18}$$

将式(18)代回式(17),可得起皱临界应力 s_{1cr} :

$$\begin{aligned} s_{1cr} = & \frac{NkT(1+\lambda^2)\lambda^3}{3} \left(\frac{2NkT(1+\lambda^2)\lambda^3(3-\mu)(1+\mu)}{3E_s} \right)^{-2/3} \\ & + \frac{E_s}{(3-\mu)(1+\mu)} \left(\frac{2NkT(1+\lambda^2)\lambda^3(3-\mu)(1+\mu)}{3E_s} \right)^{1/3} \end{aligned} \tag{19}$$

联立求解式(10)、(11)、(18)和(19)即可求得不同环境条件下光热敏感凝胶膜起皱的临界应力和临界波长。

表 1 给出了数值模拟所需的材料参数和物理常数。在模拟时将溶液化学势用温度 $T_* = 300\text{K}$ 的

kT_* 进行无量纲化处理;将临界应力 s_{1cr} 用 $T_*=300K$ 时的 NkT_* 进行无量纲化处理;临界波长 l_{cr} 用薄膜初始厚度 h_0 进行无量纲化处理。

图 2 给出了温度 $T_0=300K$ 时不同光强条件下光热敏感凝胶膜面内应力随溶剂化学势变化的关系曲线。图 3 给出了光强 $I_0=40W$ 时不同温度条件下光热敏感凝胶膜面内应力随溶剂化学势变化的关系曲线。由图 3 可见,光强、温度相同时,溶剂的化学势越大,发生起皱的临界应力越大。这是因为当溶剂的化学势越大时,溶剂越难被凝胶吸收,凝胶吸收的溶剂的量越少,凝胶越硬,因此需要越大的压应力才能使凝胶发生起皱变形。由图 2 和图 3 还可以看出,当溶剂化学势相同时,环境的光强越强、温度越高时,使光热敏感凝胶膜发生起皱的临界应力越大。

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			
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 $h/(\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	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 $c_n/(\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1})$	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 $c_w/(\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1})$	2.4×10^7
泊松比 μ	0.5		

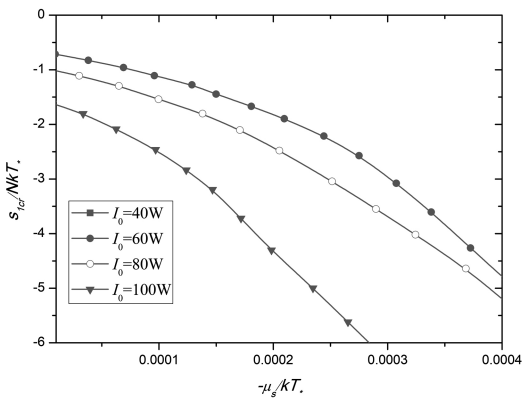


图 2 不同光强条件下,光热敏感凝胶膜起皱临界应力随溶剂化学势变化的关系曲线
 $T_0=300K, -\mu_0/kT_*=0.001$

Figure 2 The relationships between the critical wrinkling stress of the photo-thermal sensitive hydrogeland the chemical potential under different light intensity
 $T_0=300K, -\mu_0/kT_*=0.001$

NkT/E_s 为光热敏感凝胶膜-基底结构的刚度系数。图 4 给出了环境温度 $T_0=300K$, 溶液初始化学势 $-\mu_0/kT_*=0.001$ 时,光强分别为 40W、60W 和 80W 时光热敏感凝胶膜发生起皱的临界波长随膜-基结构的刚度系数变化的关系曲线。由图可见,光热敏感凝胶膜-基底结构的刚度系数越小,凝胶膜发生起皱失稳时所对应的临界波长越大;刚度系数和环境温度相同的情况下,环境光强越弱,凝胶膜发生起皱失稳时所对应的临界波长越小;刚度系数和环境光强相同的情况下,温度越低,凝胶膜发生起皱失稳时所对应的临界波长越小。

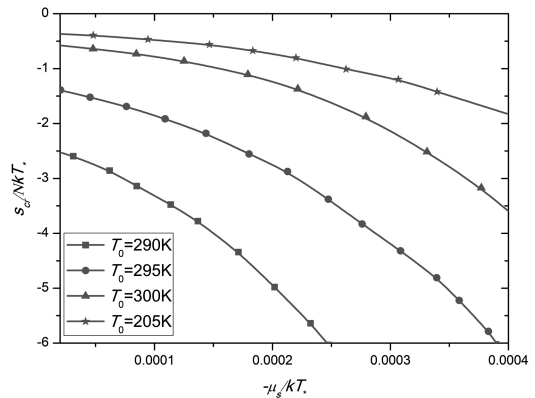


图 3 不同温度条件下,光热敏感凝胶膜起皱临界应力随溶剂化学势变化的关系曲线
 $I_0 = 40W, -\mu_0/kT_* = 0.001$

Figure 3 The relationships between the critical wrinkling stress of the photo-thermal sensitive hydrogel and the chemical potential under different temperature

$$I_0 = 40W, -\mu_0/kT_* = 0.001$$

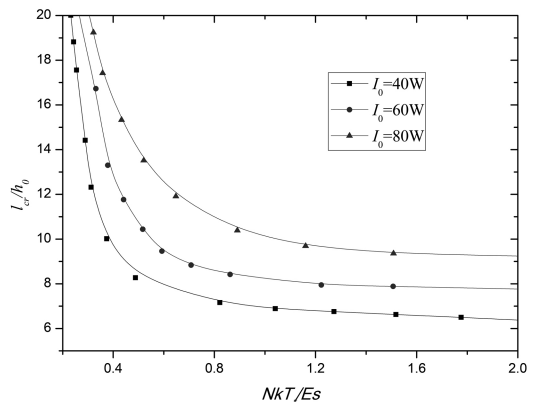


图 4 不同光强条件下,光热敏感凝胶膜起皱失稳临界波长随溶剂化学势变化关系曲线
 $T_0 = 300K, -\mu_0/kT_* = 0.001$

Figure 4 The relationships between the critical wrinkling wavelength of the photo-thermal sensitive hydrogel and the chemical potential under different light intensity

$$T_0 = 300K, -\mu_0/kT_* = 0.001$$

3 结论

本文基于光热敏感凝胶大变形理论和冯卡门非线性薄板理论对粘附于弹性基底的光热敏感凝胶膜的起皱失稳行为进行分析,给出了起皱临界应力与临界波长的计算方法,得出了临界应力、临界波长随光强、温度以及溶剂化学势的变化关系,结果表明:环境的光强、温度相同时,溶剂的化学势越大,光热敏感凝胶膜起皱的临界应力越大;溶剂化学势相同时,环境的光强越强、温度越高,临界应力越大;环境温度和光强相同的情况下,光热敏感凝胶膜-基底结构的刚度系数越小,起皱时的临界波长越大;刚度系数相同的情况下,环境温度越低,光强越弱,起皱临界波长越小。在本文的基础上结合有限元软件,将有望对更加复杂结构的光热敏感凝胶膜的失稳行为进行分析,为光热敏感凝胶膜的优化设计提供理论指导。

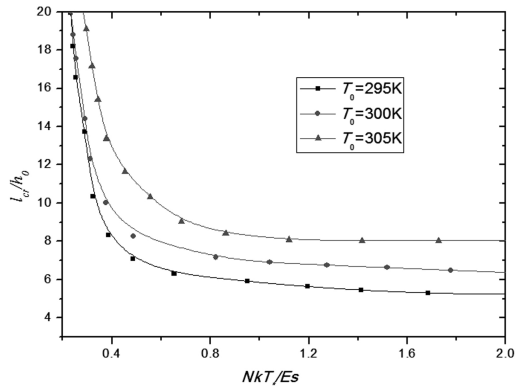


图 5 不同温度条件下,光热敏感凝胶膜起皱失稳临界波长随溶剂化学势变化关系曲线

$$I_0 = 40W, -\mu_0/kT_* = 0.001$$

Figure 5 The relationships between the critical wrinkling wavelength of the photo-thermal sensitive hydrogel and the chemical potential under different temperature

$$I_0 = 40W, -\mu_0/kT_* = 0.001$$

参考文献：

[1] Liu Z S, Swaddiwudhipong S, Hong W. Soft Matter, 2013, 9: 577~587.
[2] Liu Z S, Toh W, Ng T Y. Int J Appl Mech, 2015, 7(5): 1530001.
[3] 张辰佳,王世斌,李林安,薛秀丽,亢一澜.实验力学,2015, 30(3): 263~268.
[4] Huang R. J Mech Phys Solids, 2005, 53(1): 63~89.
[5] Sultan E, Boudaoud A. J Appl Mech, 2008, 75: 051002.
[6] Kang M Y, Huang R. J Mech Phys Solids, 2010, 58(10): 1582~1598.
[7] Liu Z S, Swaddiwudhipong S, Cui F S, Hong W, Suo Z G. Int J Appl Mech, 2011,3(2): 235~257.
[8] 黄萧,李博,冯西桥.第十四届全国物理力学学术会议论文集, 2016: 65.
[9] 张校维,易成智,颜慧贤,金波.力学季刊,2016,37(4): 638~647.
[10] 黄春阳,唐山,彭向和.力学学报, 2017, 49(4): 758~768.
[11] Toh W, Ng T Y, Hu J Y, Liu Z S. Int J Solids Struct, 2014, 51(25):4440~4451.

Study of the Critical Wavelength and Critical Stress of Wrinkling of Thin Photo-thermal Sensitive Hydrogel Film on Elastic Substrate

YAN Hui-xian^{1,2*}, WEI Mao-jin^{1,2}, YAO Hao-jie¹

(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)

Abstract: Thin photo-thermal sensitive hydrogel film on elastic substrate has been widely used in the fields of micromechanics system (MEMS), biosensors and actuators. Due to the confinement of the elastic substrate, when the photo-thermally sensitive hydrogel swelling with the change of external temperature or light intensity, the existence of the compressive stress in the hydrogel film makes the film wrinkle. Based on the finite deformation theory of the photo-thermally sensitive hydrogel and von Karman nonlinear plate theory, this paper studied the wrinkling mechanism of the photo-thermally sensitive hydrogel film and analyzed the effects of light intensity, temperature, chemical potential of the solvent and the stiffness coefficient of the substrate on the critical wavelength and critical stress of wrinkling of photo-thermally sensitive hydrogel film. The results show that: when the temperature and light intensity keep the same, the critical stress decreases with increasing chemical potential of the solution; when the chemical potential keeps the same, the higher the light intensity and temperature, the greater the critical stress; when the light intensity and the temperature keep the same, the smaller the stiffness coefficient, the greater the critical wavelength; for the same stiffness coefficient, the lower light intensity and the temperature, the smaller the critical wavelength.

Key words: Photo-thermal sensitive hydrogel; Film-substrate structure; Wrinkling; Critical wavelength; Critical stress