

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2020.293

正弦表面结构的薄膜失稳形貌有限元分析和实验验证

杨玺琳¹, 刘海东¹, 贾飞², 吴良科³, 古斌¹

(1.西南科技大学制造科学与工程学院, 四川绵阳 621010; 2.哈尔滨工业大学航天科学与力学系, 哈尔滨 150001;
3.重庆大学航空航天学院, 重庆 400044)

摘要:利用 ABAQUS 有限元软件, 对具有正弦表面结构的薄膜-基底系统表面失稳过程进行了系统的有限元分析, 讨论了正弦结构幅值/波长比、薄膜-基底模量比、薄膜厚度以及预拉伸变形等因素对薄膜表面失稳形貌的影响。结果表明: 薄膜-基底模量比和薄膜厚度对薄膜的表面失稳波长造成较大影响; 正弦结构幅值/波长比对正弦结构波峰与波谷处的失稳波长差值有显著影响。通过上述变量的相互组合, 有望实现对膜-基系统表面失稳形貌的调控。通过与实验结果的对比, 定性验证了数值模拟方法的可靠性。研究工作对于探究复杂表面结构的薄膜失稳形貌具有参考价值。

关键词: 正弦结构; 薄膜失稳; 数值模拟; 失稳形貌

中图分类号: O484.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2021)10-095-11

Finite element analysis and experimental verification of surface instability morphology of thin film with sinusoidal surface structures

YANG Xilin¹, LIU Haidong¹, JIA Fei², WU Liangke³, GU Bin¹

(1.School of Manufacturing Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, P. R. China; 2. Department of Astronautical Science and Mechanics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, P. R. China; 3. College of Aerospace Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: In this work, finite element analysis on the surface instability process of a film-substrate system with the sinusoidal surface structures is systematically carried out by using ABAQUS finite element software. The effects of the elements on surface instability morphology, including ratio of amplitude to wavelength of the sinusoidal structure, the modulus ratio of film to substrate, the film thickness and the pre-stretched deformation, are discussed. The results show that the modulus ratio and the film thickness have considerable influence on the wavelength of the film surface instability. The ratio of amplitude to wavelength of the sinusoidal structure plays a significant role in differentiating the instability wavelength at

收稿日期: 2019-12-26 **网络出版日期:** 2020-03-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11772276, 11872324); 四川省教育厅科技项目(18ZA0499)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(11772276, 11872324) and Science and Technology Project of Sichuan Provincial Department of Education (18ZA0499).

作者简介: 杨玺琳(1995—), 男, 西南科技大学硕士研究生, 主要研究方向为薄膜失稳和表面微形貌, (E-mail)865294607@qq.com。

通讯作者: 古斌, 男, 西南科技大学制造科学与工程学院教授, 主要从事固体力学、致密气藏中气体运移以及多场耦合材料力学行为等方面的研究, (E-mail)gubin@swust.edu.cn。

the peak and trough of the sinusoidal structure. Means to control the instability morphology of the film-substrate systems by various combinations of the above parameters are proposed. Compared with the experimental results, the reliability of the numerical simulation method is qualitatively verified. The research work is of reference value for exploring the instability of thin films with complex surface structures.

Keywords: instability morphology; film-substrate system; sinusoidal surface structure; finite element analysis

表面褶皱现象在自然界中广泛存在,特殊的表面微形貌可以赋予材料不同的功能^[1-3],因此如何构筑复杂的表面形貌具有十分重要的理论与实际应用价值。近年来,研究人员通过表面失稳、化学刻蚀、光诱导的高分子交联技术、纳米压印、等离子体处理等手段构筑材料表面微结构^[4-8]。其中,表面失稳以其形貌和尺度易于调控、构筑方法简易、成本低廉和大量潜在应用等优点受到学者青睐^[9-11]。

对薄膜-基底双层体系的表面失稳形貌构筑,迄今已展开了大量的研究工作,形成了一系列较为成熟的理论指导。对平面薄膜-基底系统,Li 等^[12]给出了薄膜临界失稳应变 ϵ_f^c 和波长 λ_f^c 的解析表达式,分别为:

$$\epsilon_f^c = \frac{1}{4} \left(\frac{\mu_f}{3\mu_s} \right)^{-2/3}, \quad (1)$$

$$\lambda_f^c = 2\pi h \left(\frac{\mu_f}{3\mu_s} \right)^{1/3}, \quad (2)$$

式中, μ_f 和 μ_s 分别为薄膜和基底的剪切模量, h 为薄膜厚度,薄膜和基底的泊松比均取为 0.5。在此基础上,Cai 等^[13]探讨了微小曲率对平面薄膜临界失稳载荷和波长的影响,并给出了修正后的值为

$$\epsilon_f^c = \frac{1}{4} \left(\frac{\mu_f}{3\mu_s} \right)^{-2/3} (1 + \Omega^2), \quad (3)$$

$$\lambda_f^c = 2\pi h \left(\frac{\mu_f}{3\mu_s} \right)^{1/3} (1 - \Omega^2), \quad (4)$$

式中 Ω 为与曲率相关的量,可表示为:

$$\Omega = \sqrt{3} \frac{h}{R} \left(\frac{\mu_f}{3\mu_s} \right)^{2/3}, \quad (5)$$

式中 R 为薄膜的初始曲率半径。

除理论分析外,Xie 等^[14]通过有限元方法建立了平面薄膜表面失稳模型,讨论了薄膜-基底模量比和薄膜厚度对表面失稳形貌的影响,并分析了多层结构的失稳演化过程,发现薄膜失稳具有多种模态。此外,基于聚二甲基硅氧烷 (polydimethylsiloxane, PDMS) 材料,利用失稳进行表面形貌制备的实验研究也见诸报道^[15]。其中薄膜制备的主要原理是在紫外和臭氧 (UVO) 共同作用下,PDMS 表面发生氧化,从而使其表面形成一层由硅氧化物组成的多相硬化层^[16]。对由硬化薄膜层和软基底组成的系统,当内压缩应变达到一定值时,即会产生表面失稳。例如,通过格栅形金属遮光罩形成刚度周期性变化的薄膜,可以形成五种典型的失稳形貌^[17]。Shao 等^[18]通过预拉伸条形 PDMS,然后在 UVO 环境下进行表面硬化处理,释放预拉伸载荷后得到规则的正弦失稳形貌。在利用 PDMS 材料倒模复制失稳形貌的基础上,沿零曲率方向重复预拉伸、表面硬化处理和载荷释放等过程,可得到多级表面失稳形貌。

目前,大部分薄膜-基底体系的表面失稳研究都基于平面薄膜^[19-23],对具有复杂表面结构的薄膜失稳研究非常有限。而自然界中物体表面一般是非平面的,研究非平面薄膜的表面失稳有利于加深对薄膜-基底体系表面失稳过程的理解,同时具有很大的应用潜力。笔者针对具有正弦表面结构的硬膜-软基底系统,利用有限元和实验方法研究其表面失稳过程,分析和探讨了正弦结构幅值/波长比、薄膜-基底模量比、薄膜厚度以及预拉伸变形等参数对表面失稳形貌的影响。

1 有限元分析

1.1 有限元模型

考虑平面应变状态下图 1 所示的具有周期性正弦表面结构的膜-基系统。建立笛卡儿坐标系 Oxy , 原点 O 位于基底的左侧下端面, x 和 y 轴分别沿水平和竖直方向。膜-基系统沿水平方向的初始长度为 L_0 , 基底的平均厚度为 H_0 , 正弦结构的幅值为 A , 正弦表面结构的波长为 λ_0 , 薄膜厚度为 h 且远小于 H_0 。基底和薄膜均为不可压缩的 neo-Hookean 材料, 在初始状态下, 薄膜和基底为同一材料, 剪切模量均为 μ_s 。表面失稳形貌构筑过程的有限元模拟步骤包括: 1) 将系统沿着 x 轴方向拉伸到初始长度的 $(1+\xi)$ 倍并保持; 2) 改变薄膜部分的剪切模量为 μ_t , 此时薄膜内部的应力几乎为零; 3) 释放两端的载荷使系统自由回缩, 由于薄膜与基底间的失配应力, 引起膜-基系统的表面失稳。

有限元模拟中, 假设基底和薄膜之间为理想黏接。正弦表面结构的波长 $\lambda_0 = 10$ mm 且保持不变, 模型初始长度 $L_0 = 2\lambda_0$, 基底平均厚度 $H_0 = \lambda_0/4$ 。模型左侧边界的 x 方向位移和底部边界 y 方向位移固定, 右侧边界受到外载作用, 薄膜上表面处于应力自由状态。通过 ABAQUS 软件中的生死单元技术 (model change method) 实现表面薄膜剪切模量的改变。由于硬膜-软基底系统的表面失稳主要发生在薄膜层, 因此在划分网格时, 薄膜和界面处基底部分采用较密的网格, 在基底底部则适当的减少网格量。在本文的有限元模型中, 所采用的单元为八节点平面应变杂交单元 (CPE8RH), 验证精度收敛性后, 总单元数为 30 000 左右。由于膜-基系统表面发生屈曲时会产生较大的变形, 将利用伪动态解法来求解^[24,25]。该方法通过在平衡方程中加入阻尼力, 可以较好的处理后屈曲发生过程中的非线性问题, 有效描述薄膜失稳的演化过程。

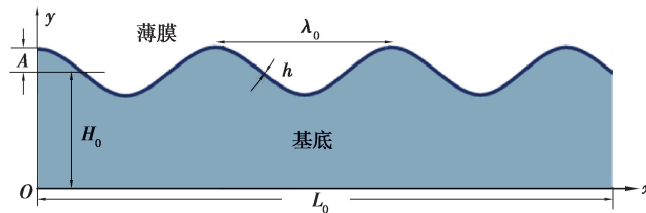


图 1 具有正弦表面结构的薄膜-基底系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a film-soft substrate system with a sinusoidal structure

1.2 数值结果和讨论

采用系统回缩到初始长度 L_0 时的失稳波长 λ 来表征膜-基系统的表面失稳形貌, 主要考察正弦表面结构的波峰和波谷处的失稳波长。此外, 在数值模拟中通过改变薄膜-基底的模量比、薄膜厚度、预拉伸变形量和正弦结构幅值等参数, 讨论相关参数对失稳波长的影响。

1.2.1 薄膜-基底模量比的影响

图 2(a) 给出当 $A = 0.25$ mm, $h = 0.05$ mm, $\xi = 0.2$ 时, 波峰和波谷处的失稳波长随薄膜-基底模量比改变时的变化规律。其中 $\eta = \mu_t/\mu_s$, 取值范围为 $10 \leq \eta \leq 100$ 。图中蓝色圆点和红色六边形点分别表示由有限元模拟得到的波峰和波谷处的失稳波长, 虚线为对应结果的拟合曲线, 其解析表达式分别为: $\lambda = 0.209\ 11\eta^{0.25}$ (波峰处) 和 $\lambda = 0.165\ 59\eta^{0.28}$ (波谷处)。由图 2(a) 可知, 随着薄膜-基底模量比的增大, 波峰与波谷处的失稳波长均逐渐增大。对于任意给定的薄膜-基底模量比, 波峰处的失稳波长大于波谷的失稳波长。两位置间失稳波长的差值如图 2(b) 所示。可以看到, 随着薄膜-基底模量比的增大, 波峰与波谷间的失稳波长差值基本保持不变。表明薄膜-基底模量比对波峰与波谷处表面薄膜失稳波长的影响一致。

此外, 有限元模拟发现当 $\eta \leq 15$ 时, 膜-基系统会出现局部表面失稳现象, 得到非周期性的复杂表面失稳形貌, 这与平面薄膜-基底系统的表面失稳现象相似^[26]。这里主要关注周期性的表面失稳形貌及其失稳波长, 因此在讨论其他参数影响时, 取薄膜-基底模量比 $\eta = 80$ 以避免引起局部表面失稳。

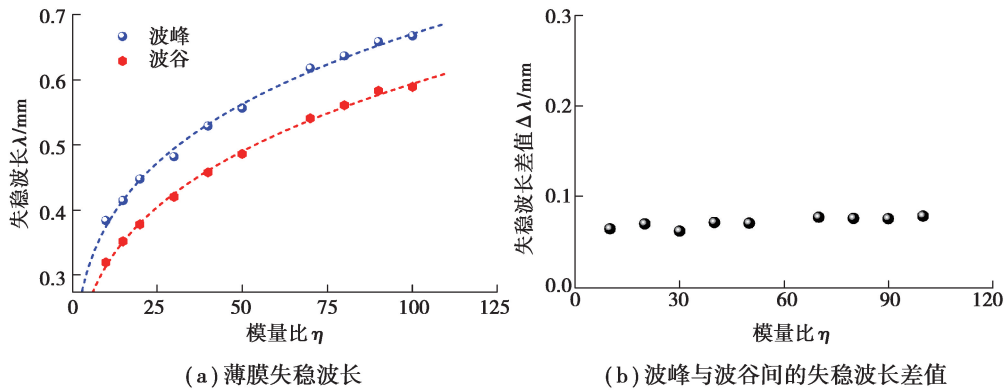


图 2 当 $A=0.25\text{ mm}$, $h=0.05\text{ mm}$, $\xi=0.2$ 时, 正弦薄膜失稳形貌随薄膜-基底模量比的变化

Fig. 2 When $A=0.25\text{ mm}$, $h=0.05\text{ mm}$, $\xi=0.2$, the instability of the sinusoidal film changes with the film-substrate modulus ratio

1.2.2 预拉伸变形量的影响

选定变量 $A=0.25\text{ mm}$, $h=0.05\text{ mm}$, $\eta=80$, 预拉伸变形量在 $0.15 \leq \xi \leq 0.35$ 范围内取值, 正弦表面结构波峰和波谷处的失稳波长及两位置间失稳波长差值的变化分别如图 3(a) 和图 3(b) 所示。图中结果表明预拉伸变形量的增加会导致波峰和波谷处失稳波长的减小, 而两位置间的失稳波长差值则轻微增大。波峰和波谷处失稳波长的变化近似符合线性规律, 可分别用线性拟合函数 $\lambda = -0.90\xi + 0.81$ (波峰处) 和 $\lambda = -1.08\xi + 0.77$ (波谷处) 表示, (如图 3(a) 中虚线所示)。

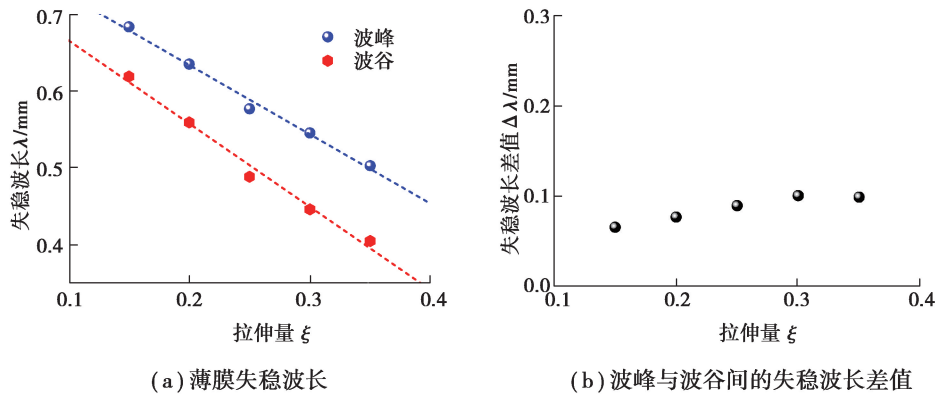


图 3 当 $A=0.25\text{ mm}$, $h=0.05\text{ mm}$, $\eta=80$ 时, 正弦薄膜失稳形貌随预拉伸变形量的变化

Fig. 3 When $A=0.25\text{ mm}$, $h=0.05\text{ mm}$, $\eta=80$, the instability of the sinusoidal film changes with the pre-stretch deformation

1.2.3 薄膜厚度的影响

为研究薄膜厚度对失稳波长的影响, 取 $A=0.25\text{ mm}$, $\eta=80$, $\xi=0.2$ 以及 $0.05\text{ mm} \leq h \leq 0.1\text{ mm}$ 。相应的有限元模拟结果见图 4(a) 和图 4(b)。从图 4(a) 可以看出, 波峰和波谷处的失稳波长均随着薄膜厚度的增加而增加, 且变化规律可近似用线性拟合函数表示, 即 $\lambda = 12.87h$ (波峰处) 和 $\lambda = 11.60h$ (波谷处)。此外, 波峰与波谷间的失稳波长差值也随着薄膜厚度的增加而增大, 但变化不明显, 如图 4(b) 所示。

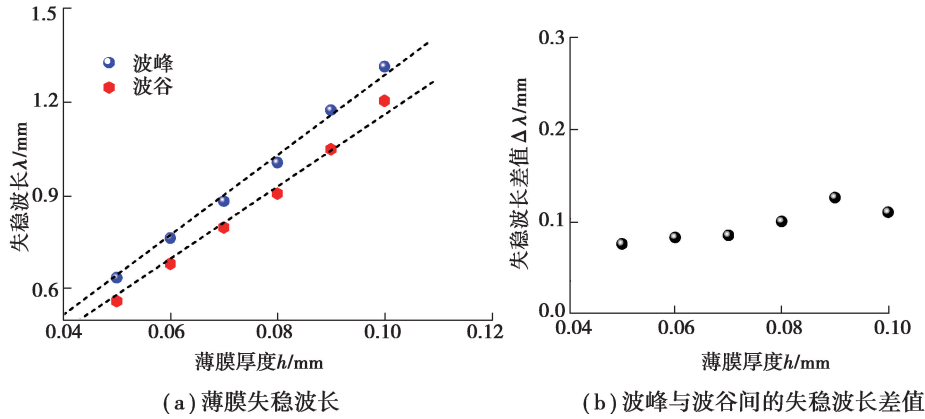


图 4 当 $A = 0.25 \text{ mm}$, $\eta = 80$, $\xi = 0.2$ 时, 正弦薄膜失稳形貌随薄膜厚度的变化

Fig. 4 When $A = 0.25 \text{ mm}$, $\eta = 80$, $\xi = 0.2$, the instability of the sinusoidal film changes with the thickness of the film

1.2.4 正弦表面结构幅值的影响

当 $h = 0.25 \text{ mm}$, $\eta = 80$, $\xi = 0.2$ 时, 正弦表面结构波峰和波谷处的失稳波长随正弦表面结构幅值的变化如图 5(a)所示, 其中正弦表面结构幅值的变化范围为 $0 \leq A \leq 1 \text{ mm}$ 。图中可以看出, 随着正弦表面结构幅值的增大, 波峰处的失稳波长呈整体增大的趋势, 而波谷处的失稳波长呈整体减小的趋势。两者都不随正弦表面结构幅值的改变而单调变化。两位置间的失稳波长差值随正弦表面结构幅值的改变发生显著变化, 且表现出随正弦表面结构幅值增加而近似线性增大的规律。该规律可用拟合函数 $\Delta\lambda = 0.36A$ 表示, 见图 5(b)。另外注意到, 当正弦表面结构幅值大于一定值时, 如 $A \geq 0.8 \text{ mm}$, 在波峰处将不发生表面失稳, 相应的失稳波长差值也未给出。

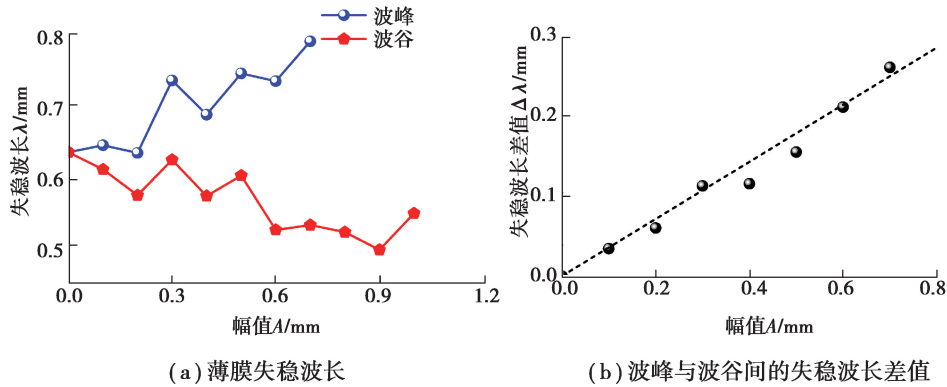


图 5 当 $h = 0.25 \text{ mm}$, $\eta = 80$, $\xi = 0.2$ 时, 正弦薄膜失稳形貌随正弦表面结构幅值的变化

Fig. 5 When $h = 0.25 \text{ mm}$, $\eta = 80$, $\xi = 0.2$, the instability of the sinusoidal film changes with the amplitude of the sinusoidal surface structure

1.3 膜-基系统表面失稳波长的经验公式

从上述有限元结果可以看出, 波峰与波谷处的失稳波长差值 $\Delta\lambda$ 主要取决于幅值 A , 而对其他因素的影响不敏感, 如图 2~5 所示。如果可以确定平面薄膜-基底系统(即 $A = 0$)的失稳波长, 再结合 $\Delta\lambda$, 即可估算波峰和波谷处的失稳波长。对于平面薄膜-基底系统, 根据公式(1)进行修正, 其失稳波长 λ 与薄膜-基底模量比、预拉伸变形量和薄膜厚度可用如下经验公式近似表示:

$$\lambda = kh(\xi + c)\eta^b \tag{6}$$

式中: k, b, c 均为常数, 需利用有限元模拟结果予以确定。首先确定参数 b , 选定变量 $h = 0.05 \text{ mm}$, $\xi = 0.2$, 薄膜-基底模量比在 $[10, 100]$ 内取值, 有限元模拟得到的失稳波长如图 6(a)中的数据点所示。依据公式(6)的形式进行曲线拟合, 可以得到 $b = 0.26$ 。此基础上, 确定参数 k 和 c 。选定变量 $h = 0.05 \text{ mm}$, $\eta = 80$, 预拉

伸变形量的变化范围为 $0.15 \leq \xi \leq 0.35$, 数值模拟得到的失稳波长如图 6(b) 中的数据点所示。通过线性拟合可得 $c = -0.725, k = -8.10$ 。为验证公式(6)的准确性, 选定 $\xi = 0.2, \eta = 80$, 改变薄膜厚度, 相应的失稳波长如图 7 中数据点所示, 图 7 中同时给出按公式(6)计算得到的失稳波长。比较两者可知, 公式(6)给出的失稳波长值具有比较可靠的准确性。对所研究的具有正弦表面结构的薄膜-基底系统(即 $A \neq 0$), 若假设波峰和波谷处失稳波长的平均值近似等于相应平面薄膜-基底系统的失稳波长, 则利用公式(6)和失稳波长差值与正弦表面结构幅值的线性关系(如图 5(b) 所示), 可以估算出正弦表面结构波峰和波谷处的失稳波长。

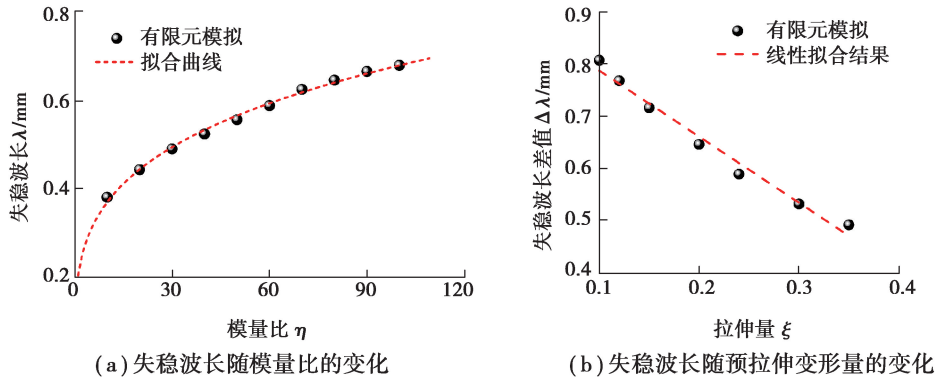


图 6 当 $h = 0.05 \text{ mm}, \xi = 0.2$ 时, 平面膜-基系统的失稳形貌

Fig. 6 When $h = 0.05 \text{ mm}, \xi = 0.2$, the instability morphology of the planar film-based system

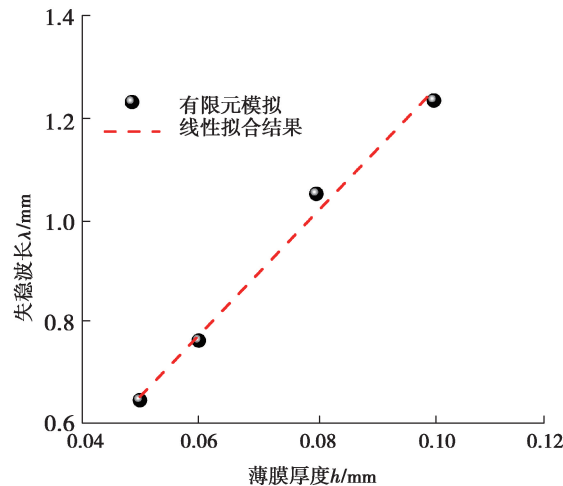


图 7 当 $\xi = 0.2, \eta = 80$ 时, 平面膜-基系统的失稳波长随薄膜厚度的变化

Fig. 7 Variation of the instability wavelength of film-substrate system of flat surface with the film thickness when $\xi = 0.2, \eta = 80$

2 表面失稳形貌的调控以及实验验证

2.1 表面失稳形貌调控的有限元模拟

前述有限元分析表明, 利用不同的参数组合可以对薄膜表面失稳形貌进行调控。此外, 通过赋予波峰和波谷区域薄膜不同的性质, 如剪切模量和厚度, 也能改变薄膜的表面失稳形貌。图 8 显示了当 $\lambda_0 = 10 \text{ mm}, A = 0.5 \text{ mm}, h = 0.05 \text{ mm}, \xi = 0.2$ 时, 波峰和波谷区域薄膜取不同剪切模量引起的表面失稳形貌。在本文中考虑了 4 种情况: 1) $\mu_b : \mu_t : \mu_s = 50 : 500 : 1$; 2) $\mu_b : \mu_t : \mu_s = 1 : 20 : 1$; 3) $\mu_b : \mu_t : \mu_s = 200 : 20 : 1$; 4) $\mu_b : \mu_t : \mu_s = 20 : 1 : 1$ 。 μ_b 和 μ_t 分别为波谷和波峰处薄膜的剪切模量, 基底的剪切模量保持不变且 $\mu_s = 1.0 \text{ MPa}^{[15]}$ 。由图 8(a) 和 (c) 可知, 当 $\mu_b \neq \mu_t > \mu_s$ 时, 正弦薄膜表面出现类似双波长正余弦条纹的形貌^[15]。而且某区域剪切模量越大, 该区域产生的失稳波长越长, 这与图 2 中均匀薄膜($\mu_b = \mu_t > \mu_s$) 的结果一致。但由于波峰与波谷

处薄膜的剪切模量不同,两位置间的失稳波长差值也有很大的差异。这与均匀薄膜时薄膜剪切模量几乎不影响失稳波长差值不同。因此,通过控制薄膜不同区域的剪切模量,可实现对局部失稳波长和区域间失稳波长差值的调控。特别是当 $\mu_t > \mu_b = \mu_s$ 或 $\mu_b > \mu_t = \mu_s$ 时,仅有波峰或波谷区域产生表面失稳,如图 8(b)和(d)所示。

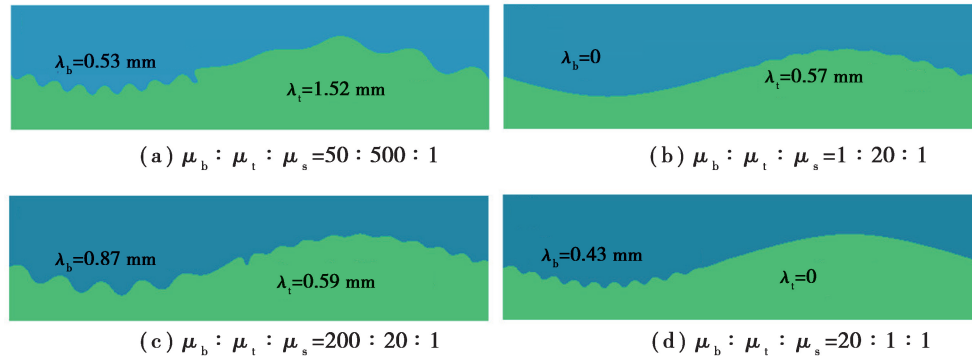


图 8 波峰、波谷与基底不同剪切模量的失稳模式

Fig. 8 Instability modes of different Young's modulus of the crest, trough and base

与调节剪切模量类似,改变薄膜不同区域处的厚度也能改变薄膜的表面失稳形貌,实现对失稳波长和失稳波长差值的调控,如图 9 所示。此时 $\lambda_0 = 10$ mm, $A = 0.5$ mm, $\eta = 50$, $\xi = 0.2$, 考虑 4 种薄膜厚度组合:(a) $h_b = 0.05$ mm, $h_t = 0$, (b) $h_b = 0.05$ mm, $h_t = 0.02$ mm, (c) $h_b = 0$, $h_t = 0.05$ mm, (d) $h_b = 0.02$ mm, $h_t = 0.05$ mm。 h_b 和 h_t 分别为表面波谷和波峰区域的薄膜厚度。当 $h_b \neq h_t$ 时,正弦薄膜表面同样出现类似双波长正余弦条纹的形貌,如图 9(b)和(d)所示。而且表面薄膜越厚的区域,失稳波长越长,波峰与波谷间的失稳波长差值也与不同区域的薄膜厚度相关。特别当表面薄膜厚度为 0 时,该区域将不会发生表面失稳,如图 9(a)和(c)所示。

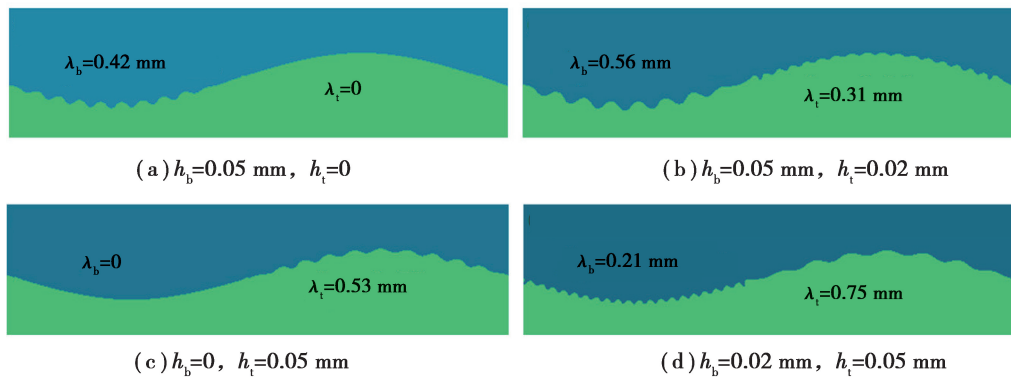


图 9 波峰与波谷位置处薄膜厚度不同时的失稳模式

Fig. 9 Instability modes when the film thickness at the peak and trough is different

本文的有限元分析表明,对硬膜-软基底系统,可以通过正弦结构幅值/波长比、薄膜-基底模量比、薄膜厚度和预拉伸变形等参数以及制备非均匀薄膜对系统表面失稳形貌进行调控。为验证有限元模拟结果,进行了利用表面失稳构筑特殊表面微形貌的实验。

2.2 表面失稳形貌调控的实验验证

实验以道康宁公司生产的硅橡胶-PDMS184 为原材料。主要仪器包括行星搅拌机(型号 AR-100,日本 THINKY 公司)、干燥箱(型号 DHG-9075A,上海一恒科学仪器有限公司)、UV 表面照射装置(型号 BZZ250G-T,汇沃科技有限公司)和扫描电子显微镜(型号 7610F,日本电子株式会社)等。

首先使用模具制作具有正弦表面结构的 PDMS 样品,试样的面内尺寸约为 5 mm × 5 cm,厚度约为 0.25 mm,如图 10 所示。为获得硬膜-软基底复合结构,实验采用 UVO 化学方法对 PDMS 样品表面进行硬

化处理,薄膜的弹性模量和厚度通过 UVO 处理时间控制。此外,为使波峰和波谷区域的薄膜性质不同,薄膜表面硬化处理分 2 次进行。实验过程与 Park 等^[27]的方法类似,如图 11 所示,主要步骤包括:1)采用自制加载设备,对 PDMS 试样施加一定比例的预拉伸;2)在预拉伸的试样表面波峰处覆盖遮光胶带,如图 11(b)所示,置于 UVO 环境中进行第一次表面硬化处理,处理时间为 T_1 ;3)取出试样,把遮光胶带由波峰移至波谷,将试样重新置于 UVO 环境中进行第二次表面处理,持续时间为 T_2 ;4)取出试样,释放施加于试件的预拉伸载荷,使试样在自由载荷情况下发生表面失稳。实验制备了 2 种试样:样品 1 的波谷位置辐照时间为 $T_1 = 30 \text{ min}$,波峰位置辐照时间 $T_2 = 120 \text{ min}$;样品 2 的波谷位置辐照时间为 $T_1 = 120 \text{ min}$,波峰位置辐照时间 $T_2 = 30 \text{ min}$ 。

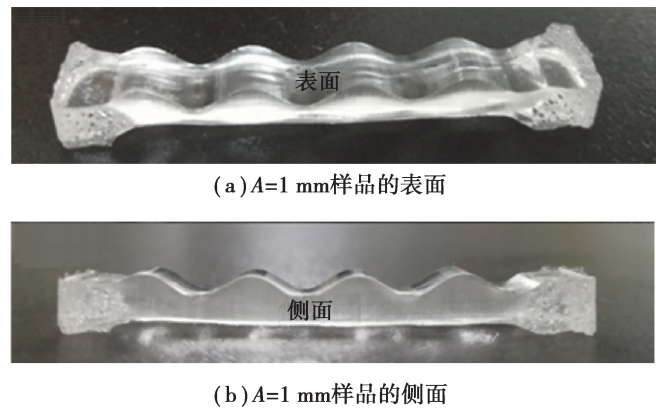


图 10 具有正弦结构表面的 PDMS 样品

Fig. 10 PDMS sample with sinusoidal surface

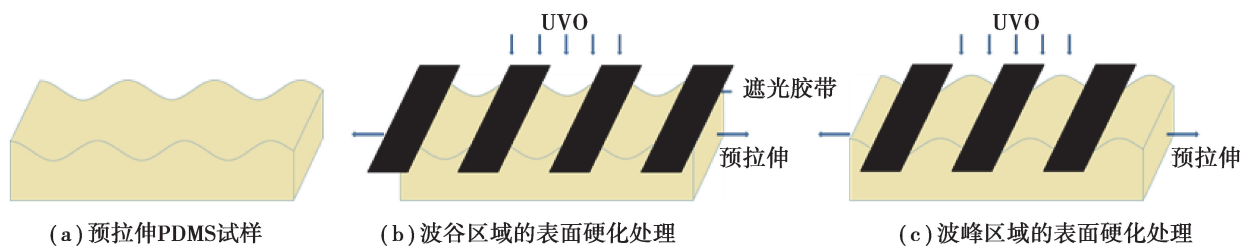


图 11 正弦结构波峰与波谷位置处失稳形貌差异化的制备方法

Fig. 11 Preparation method of differential instability at the peak and trough positions of a sinusoidal structure

利用场发射扫描电镜观测样品表面失稳形貌并测量波峰和波谷处的失稳波长,不同辐照时长的样品表面失稳形貌如图 12 所示。其中样品 1 波谷处失稳波长为 $29.813 \mu\text{m}$,波峰处失稳波长为 $124.219 \mu\text{m}$,如图 12(a)和(b)所示。样品 2 波谷处失稳波长为 $97.031 \mu\text{m}$,波峰处失稳波长为 $37.688 \mu\text{m}$,如图 12(c)和(d)所示。由于硬化处理时间越长,薄膜的剪切模量和厚度越高。样品 1 对应图 8 中算例(a)和图 9 中算例(d),样品 2 对应图 8 中算例(c)和图 9 中算例(b)。比较可知,实验结果与有限元模拟结果定性吻合。即薄膜剪切模量和厚度越高(硬化处理时间越长),失稳波长越长,而且改变不同区域的辐照时间,可以有效调控波峰与波谷区域失稳波长的差值。因此,实验结果验证了所提出的有限元模型和结果的正确性,同时该实验工艺对于实际构筑特殊表面微形貌具有一定的参考价值。另外必须指出:由于实验中薄膜的弹性模量和厚度同时受辐照时间影响,且难以精确测量,无法为数值模拟提供准确的参数。现阶段实验结果仅能定性地验证数值模拟结果,实现定量验证还需进一步的系统研究。

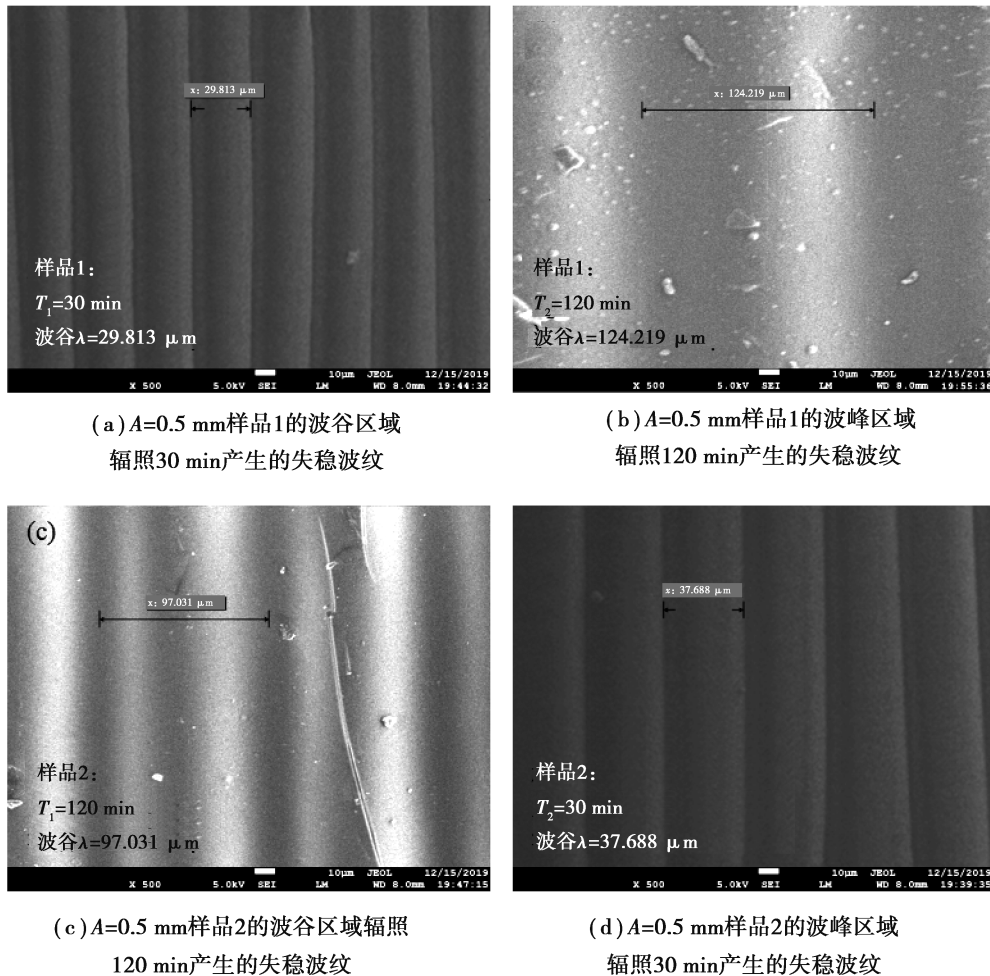


图 12 不同辐照时长正弦样品波峰与波谷位置的失稳形貌 SEM 图像

Fig. 12 SEM images of the instability of the peak and trough positions of long sinusoidal samples at different irradiation times

3 结 论

通过有限元数值模拟,研究了正弦表面结构薄膜-基底系统在面内压缩载荷作用下的失稳形貌演化规律。利用薄膜表面失稳原理,在硅橡胶表面实验构筑了特殊的表面形貌。主要的结论如下:

1)有限元模拟结果表明薄膜-基底模量比、薄膜厚度、预拉伸变形和正弦结构波幅/波长比都会对薄膜的失稳形貌产生影响。其中薄膜-基底模量比和薄膜厚度增大,或预拉伸变形减小,整体失稳波长增大,但波峰与波谷间的失稳波长差值几乎不变。而增加正弦结构波幅/波长比能显著增加失稳波长差值。

2)给出了平面薄膜-基底系统最终表面失稳波长的经验公式: $\lambda = -8.10h(\xi - 0.725)\eta^{0.26}$,以及正弦表面结构薄膜-基底系统中波峰与波谷间的失稳波长差值的经验公式: $\Delta\lambda = 0.36A$ 。由此可以对正弦表面结构薄膜-基底系统中波峰与波谷处的失稳波长进行理论估算。

3)根据有限元结果提出了利用非均匀薄膜调控表面失稳形貌的方案,并进行了实验验证,实验结果与数值结果定性吻合。同时,实验工艺提供了一种可用于构筑特殊表面微形貌的简便方法。

研究成果有助于理解自然界中某些特殊表面形貌的形成机理,在物理、仿生以及超疏水材料等领域具有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] Wang L, Shanshan L I. Wettability measurement and hydrophobicity mechanism analysis of leaf surface of *hylotelephium erythrosticktum*[J]. *Journal of Hebei University of Science and Technology*, 2018, 39(1):1-8.
- [2] Nguyen S, Webb H, Mahon P, et al. Natural insect and plant micro-/nanostructured surfaces: an excellent selection of valuable templates with superhydrophobic and self-cleaning properties[J]. *Molecules*, 2014, 19(9):13614-13630.
- [3] Guo Z, Liu W. Biomimic from the superhydrophobic plant leaves in nature: Binary structure and unitary structure[J]. *Plant Science (Oxford)*, 2007, 172(6):1103-1112.
- [4] Mueller J, Grant M. Model of surface instabilities induced by stress[J]. *Physical Review Letters*, 1999, 82(8):1736-1739.
- [5] Huang Z, Li Y F, Jin P, et al. Fabrication of aluminum superhydrophobic surface with facile chemical etching method[J]. *Materials Science Forum*, 2015, 804:103-106.
- [6] Zinggeler M, Schönberg J N, Fosso P L, et al. Functional cryogel microstructures prepared by light-induced cross-linking of a photoreactive copolymer[J]. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(14):12165-12170.
- [7] Peroz C, Chauveau V, Barthel E, et al. Nanoimprint lithography on silica sol-gels: a simple route to sequential patterning[J]. *Advanced Materials*, 2009, 21(5):555-558.
- [8] Seo E D. AFM and specular reflectance IR studies on the surface structure of poly (ethylene terephthalate) films upon treatment with argon and oxygen plasmas[J]. *Macromolecular Research*, 2004, 12(1):134-140.
- [9] Yin S F, Li B, Cao Y P, et al. Surface wrinkling of anisotropic films bonded on a compliant substrate[J]. *International Journal of Solids & Structures*, 2018, 141/142:219-231.
- [10] Zong C, Zhao Y, Ji H, et al. Patterning surfaces on azo-based multilayer films via surface wrinkling combined with visible light irradiation[J]. *Macromolecular Rapid Communications*, 2016, 37(15):1288-1294.
- [11] 贾飞, 郑修鹏, 曹艳平, 等. 基于双层薄膜失稳测量弹性模量技术的理论分析[C]//北京力学学会第17届学术年会论文集.北京:北京力学学会, 2011:159.
- Jia F, Zheng X P, Cao Y P, et al. Theoretical analysis of elastic modulus measurement based on double-layer film instability[C]//Proceedings of the 17th Annual Conference of the Beijing Mechanical Society. Beijing: Beijing Mechanics Society, 2011: 159. (in Chinese)
- [12] Li B, Cao Y P, Feng X Q, et al. Mechanics of morphological instabilities and surface wrinkling in soft materials: a review[J]. *Soft Matter*, 2012, 8(21): 5728-5745.
- [13] Cai S, Breid D, Crosby A J, et al. Periodic patterns and energy states of buckled films on compliant substrates[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2011, 59(5):1094-1114.
- [14] Xie W H, Huang X, Cao Y P, et al. Buckling and postbuckling of stiff lamellae in a compliant matrix[J]. *Composites Science and Technology*, 2014, 99:89-95.
- [15] 冯西桥, 曹艳平, 李博. 软材料表面失稳力学[M]. 北京: 北京科学出版社, 2017.
- Feng X Q, Cao Y P, Li B. Surface instability mechanics of soft materials[M]. Beijing: Beijing Science Press, 2017. (in Chinese)
- [16] 王嘉文, 李博, 曹艳平, 等. 具有界面微结构的微结构膜-基系统表面失稳[C]//中国力学学会会议论文集.北京:中国力学学会, 2015:289.
- Wang J W, Li B, Cao Y P, et al. Surface instability of microstructured membrane-based systems with interface microstructures[C]//Proceedings of the Chinese Society of Mechanics. Beijing: Chinese Society of Mechanics, 2015: 289. (in Chinese)
- [17] Efimenko K, Rackaitis M, Manias E, et al. Nested self-similar wrinkling patterns in skins[J]. *Nature Materials*, 2005, 4(4):293-297.
- [18] Shao Z C, Zhao Y, Zhang W Y, et al. Curvature induced hierarchical wrinkling patterns in soft bilayers[J]. *Soft Matter*, 2016, 12(38):7977-7982.

- [19] Ouchi T, Yang J W, Suo Z G, et al. Effects of stiff film pattern geometry on surface buckling instabilities of elastic bilayers[J]. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 10(27): 23406-23413.
- [20] Liu L X, Kirkaldy J S. The nature of the planar instability and pattern selection mechanisms attending directional thin film alloy solidification[J]. *Journal of Crystal Growth*, 1994, 144(3/4):335-345.
- [21] 张正才, 张满弓, 甯尤军, 等. 液体表面非均匀薄膜失稳的力学研究[J]. *重庆大学学报*, 2018, 41(5):30-36.
Zhang Z C, Zhang M G, Ning Y J, et al. A Study on the instability of heterogeneous films on liquid surface[J]. *Journal of Chongqing University*, 2018, 41(5):30-36. (in Chinese)
- [22] 孟吉祥, 吴枝根. 弹性材料层表面失稳的解析解[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2014, 37(2):220-224.
Meng J X, Wu Z G. Analytical solution for instability of the surface of elastic material layer [J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2014 (2):220-224. (in Chinese)
- [23] 李凯. 软弹性体和薄膜的形貌形成及调控[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2010.
Li K. Morphology formation and regulation of soft elastomers and films [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010. (in Chinese)
- [24] 郑修鹏. 弹性软基底上薄膜和纤维失稳的理论分析和数值模拟[D]. 北京: 清华大学, 2010.
Zheng X P. Theoretical analysis and numerical simulation of film and fiber instability on elastic soft substrates [D]. Beijing: Tsinghua University, 2010. (in Chinese)
- [25] 卓立军. 硬膜—软基系统倍周期分岔的理论分析与数值模拟[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
Zhuo L J. Theoretical analysis and numerical simulation of period-doubling bifurcation of hard film-soft foundation system [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
- [26] Cao Y P, Hutchinson J W. Wrinkling phenomena in neo-hookean film/substrate bilayers [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 79(3):031019.
- [27] Park J H, Lee D W. Highly reproducible and scalable transparent PDMS thin film with super-hydrophobic surface [C/OL]. 2017 IEEE 30th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). New York, USA: IEEE, 2017(2017-02-28)[2020-01-25]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7863499>

(编辑 郑洁)