

薄膜二次屈曲行为的数值仿真分析

李云良^{1,2}, 谭惠丰³, 谭忆秋¹, 鲁明宇⁴, 欧进萍^{2,5}

(1. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 哈尔滨 150090, liyl-hit@163.com; 2. 哈尔滨工业大学 土木工程博士后流动站, 哈尔滨 150090; 3. 哈尔滨工业大学 复合材料与结构研究所, 哈尔滨 150001; 4. 香港理工大学 机械工程学院, 香港; 5. 大连理工大学 土木水利学院, 大连 116023)

摘要: 建立了薄膜二次屈曲分析的数值方法. 采用施加面外扰动力的方式在薄膜中引入任意的初始缺陷, 分析了薄膜的二次屈曲现象. 分析表明, 在薄膜的后屈曲过程中, 由于初始缺陷的存在, 褶皱构形不稳定, 出现二次屈曲现象, 产生了新的褶皱. 后屈曲平衡路径呈现多阶段的特点. 在不同的初始缺陷和加载过程的情况下, 薄膜的后屈曲过程会出现连续的二次屈曲现象. 二次屈曲过程中薄膜可能是稳定的也可能是不稳定的, 与初始缺陷及加载过程有关.

关键词: 薄膜; 褶皱; 二次屈曲; 数值方法

中图分类号: O343

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)05-0784-04

Numerical simulation analysis of membrane secondary buckling behavior

LI Yun-liang^{1,2}, TAN Hui-feng³, Tan Yi-qiu¹, LU Ming-yu⁴, OU Jin-ping^{2,5}

(1. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China, liyl-hit@163.com; 2. Post-doctoral Research Center in Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 3. Center for Composite Materials, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 4. Dept. of Mechanical Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China; 5. School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: Numerical analysis method of membrane secondary buckling was developed. Arbitrary initial flaw was introduced into membrane by applying outside disturbance, and the phenomenon of membrane secondary buckling was analyzed. It is indicated that in the process of membrane post-buckling, the phenomenon of membrane secondary buckling appears because of initial flaw, wrinkle configuration is instable, and new wrinkles are produced. Post-buckling equilibrium path presents the multistage characteristic. In the case of different initial flaws and loading processes, the phenomenon of continuous secondary buckling emerges in the process of membrane post-buckling. It is concluded that membrane can be stable or not in the course of secondary buckling, which depends on initial flaw and loading process.

Key words: membrane; wrinkle; secondary buckling; numerical method

当结构进入到后屈曲阶段时, 一些结构可能出现屈曲模态突然的变化, 这一现象被称为模态跳跃. Stein^[1]曾发现, 随着加载过程的延续, 矩形板在

后屈曲阶段会出现纵向波形的突然变化, 这种现象后来被称为二次屈曲. Keller 和 Reiss^[2]在进行轴对称圆盘的实验中也出现了二次屈曲现象, 在边缘处出现了环向的褶皱变形. 此后, Stoll 和 Olson^[3]在进行薄板的单轴压缩实验中也发现了二次屈曲现象.

针对实际存在的二次屈曲现象, 很多研究者进行了理论研究和数值模拟分析^[4-7]. 对于某些板壳结构在二次出现过程中, 其承载能力有所提高, 并

收稿日期: 2009-03-11.

基金项目: 新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-08-0150).

作者简介: 李云良(1973—), 男, 讲师;

谭惠丰(1969—), 男, 教授, 博士生导师;

谭忆秋(1968—), 女, 教授, 博士生导师;

欧进萍(1959—), 男, 教授, 中国工程院院士.

没有失稳, 因此研究二次屈曲具有工程意义. 在实际的屈曲行为中, 存在着—类特殊的屈曲现象, 即薄膜的屈曲. 在薄膜结构中, 由于薄膜的弯曲刚度很小, 所以当薄膜中出现压应力时, 薄膜会产出面外变形而形成褶皱, 这一特殊的面外变形现象, 可以处理为薄膜的屈曲行为, 对于薄膜屈曲行为的分析可以获得薄膜的褶皱变形模式^[8-9]. 除了对褶皱的面外变形进行预测分析之外, 通过对薄膜的后屈曲过程的分析可以预知, 当薄膜中出现褶皱进入到后屈曲阶段时, 薄膜的屈曲模态并不一定是稳定的. 即随着加载过程的延续, 其后屈曲的褶皱模式并不一定是单纯的褶皱幅度的变化, 有可能出现波形的跳跃, 即有新的褶皱出现. 也就是在后屈曲的过程中, 通过进一步的屈曲而产生了新的褶皱, 本文将这一过程定义为薄膜褶皱的二次屈曲. 目前对于薄膜褶皱的二次屈曲现象还没有进行较为深入的研究.

本文考虑了薄膜具有微小的初始面外变形, 采用有限元软件, 分析了不同加载过程中薄膜的二次屈曲过程, 研究了二次屈曲平衡路径的特点, 并分析了二次屈曲过程中褶皱的变形模式.

1 薄膜二次屈曲分析模型

本文所建立的薄膜二次屈曲的分析模型如图 1 所示. 薄膜的尺寸为 380 mm × 120 mm. 材料常数如弹性模量、泊松比、及薄膜厚度分别为: $E = 3.53 \text{ GPa}$, $\mu = 0.3$, $t = 50 \text{ }\mu\text{m}$. 位移边界条件为: 左右边界为自由边界; 上边缘首先向 y 方向拉伸一个小的距离 δ_2 , 以使薄膜中产生一定的初始应力, 然后上边缘向 x 方向产生剪切变形 δ_1 . 此时在薄膜中会产生与底边成 θ 角的斜向褶皱. 通过本

模型分析后屈曲过程中的二次屈曲现象.

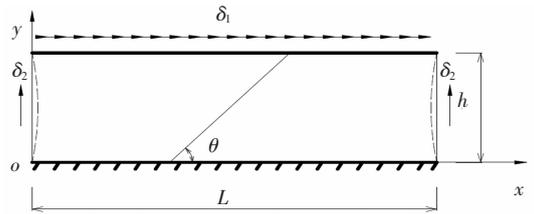


图 1 剪切矩形薄膜

2 二次屈曲的数值分析方法

对于图 1 所示的剪切薄膜褶皱二次屈曲分析模型, 基于 ANSYS 程序建立的二次屈曲数值分析流程如图 2 所示. 首先采用壳单元建模, 考虑薄膜微小的弯曲刚度; 施加初始张紧力, 使薄膜具有一定的初始几何刚度, 使分析能够启动; 施加初始缺陷, 本文考虑的薄膜不是完全的平面薄膜, 而是具有一定的微小的面外变形(其量级与薄膜的厚度相当), 对于这样微小的面外变形, 在建模的过程中是无法考虑的, 所以本文采用载荷步中施加的方法, 即施加垂直于薄膜表面的面外扰动力, 使薄膜产生任意形式的面外变形来作为其所具有的初始缺陷. 扰动力的具体施加方式为: 选取若干个节点, 在每个节点上施加垂直薄膜表面的集中力, 力的大小为 0.01 N, 并使正负集中力的数量相同, 以保持薄膜所受的面外合力为零; 施加边界上的剪切载荷; 进行非线性后屈曲分析, 为了获得二次屈曲的平衡路径和平衡位形, 使分析能够收敛, 要采取控制收敛的措施, 最主要的就是采取位移控制收敛的方式, 并结合二分法、重新启动分析及 N-R 法, 综合采取些措施可以使分析获得收敛; 后处理, 得到二次屈曲的平衡路径及其平衡位形.

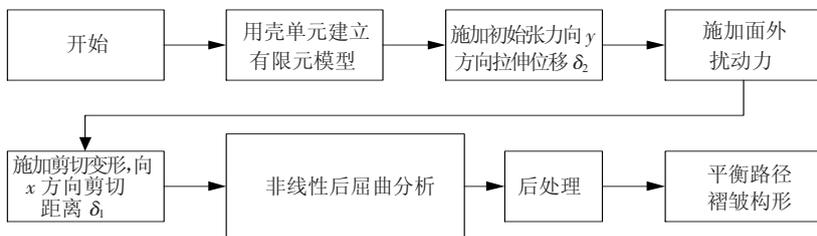


图 2 二次屈曲分析流程

分析中采用壳 63 单元建模, 考虑薄膜的弯曲刚度. 单元数量为 5 080 个, 采用的边界载荷为 $\delta_1 = 0 \sim 3 \text{ mm}$, $\delta_2 = 0.1 \text{ mm}$.

3 二次屈曲分析

3.1 单次二次屈曲

采用图 2 所示的二次屈曲分析流程对薄膜的

二次屈曲现象进行分析. 剪切距离为 1 mm 和 3 mm 时薄膜的纵向中线面外变形曲线如图 3 和图 4 所示. 从图上可知, 当剪切距离为 1 mm 时薄膜产生了 24 个褶皱, 而当剪切距离为 3 mm 时产生了 26 个褶皱. 由此可见, 当剪切距离从 1 mm 至 3 mm 的加载过程中, 由已有褶皱分岔产生了新的褶皱. 当剪切距离为 1.265 mm 时, 薄膜纵向中线的面外

变形曲线如图5所示.从图上可以看出,由既有褶皱通过分岔产生了新的褶皱,即出现了二次屈曲现象.

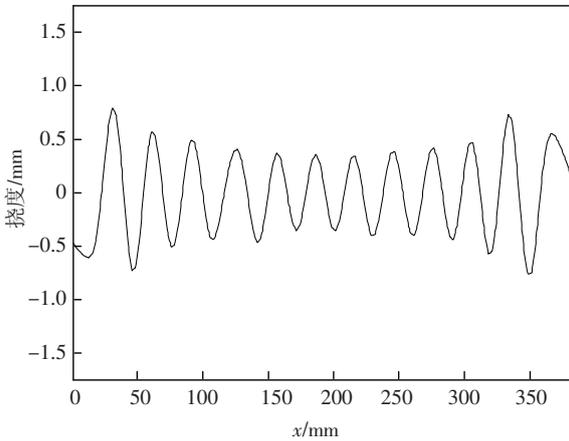


图3 褶皱构形 ($\delta_1 = 1 \text{ mm}$)

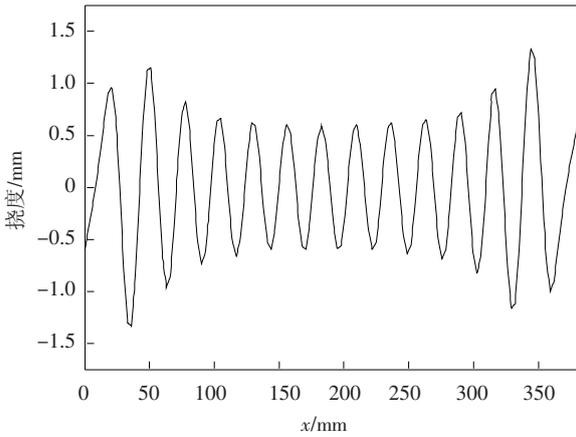


图4 褶皱构形 ($\delta_1 = 3 \text{ mm}$)

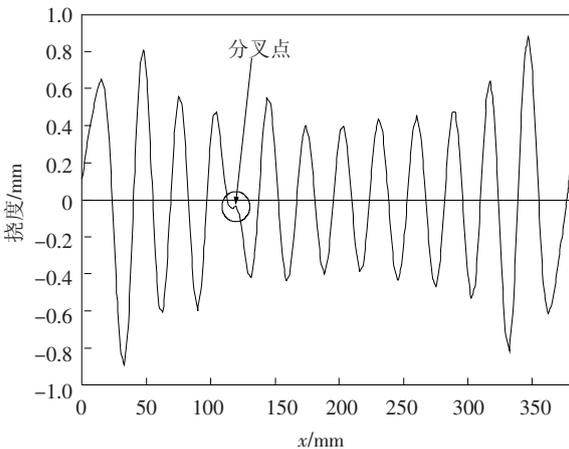


图5 褶皱构形 ($\delta_1 = 1.265 \text{ mm}$)

选取薄膜上3个节点,其屈曲平衡路径如图6所示.粗实线为基本路径,带标记的细线为分岔路径.其中节点C位于分岔区内.从曲线的变化趋势来看,可以分为五个区:I前屈曲过程;II后屈曲波动过程;III二次屈曲过程;IV二次屈曲波动过程;V稳定后屈曲过程:

前屈曲过程(I区):由于薄膜具有微小的初始缺陷,且有一定的初始面外变形,所以其前屈曲平

衡路径略微偏离了基本平衡路径;

后屈曲波动过程(II区):由于具有初始缺陷,所以其分支点不是很明确.并且在这个过程中,曲线出现了拐点,即屈曲模态出现了波动,褶皱构形不稳定;

二次屈曲过程(III区):过了 P_2 点之后,3个节点处的面外变形迅速增加,但其承受的外载荷却没有明显的增加,并且马上又出现了拐点,说明在这个过程中出现了二次屈曲现象. P_2 点至 P_4 点所对应的薄膜面外变形等高线如图7所示.从图上可以看出,二次屈曲首先在边缘处产生,然后沿着波峰和波谷的中间处向薄膜中心扩展,到达 P_5 点时,二次屈曲已经完成,产生了新的褶皱.

二次屈曲波动过程(IV区):二次屈曲完成后,依然有一个小的波形的波动过程,但这种波动不像后屈曲波动过程那么显著.

稳定后屈曲过程(V区):过了 P_6 点之后,褶皱的面外变形随着载荷的增加单向连续的变化,没有出现拐点,此时褶皱构形已比较稳定,薄膜进入稳定的后屈曲状态.

另外,从平衡路径上也可以看出,整个后屈曲过程中,其承受的外载荷是不断的增加的,可见在这种情况下,薄膜的后屈曲过程依然是稳定的.

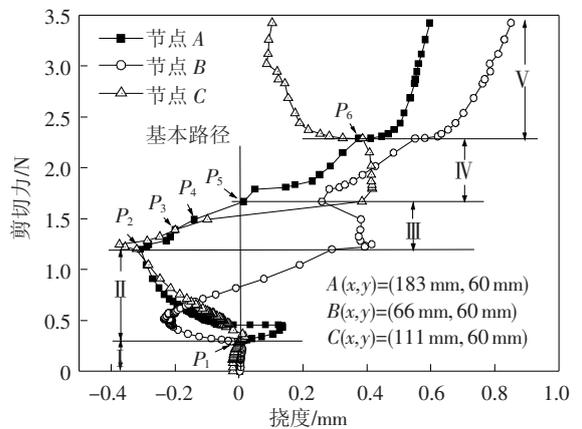


图6 具有初始缺陷的屈曲平衡路径

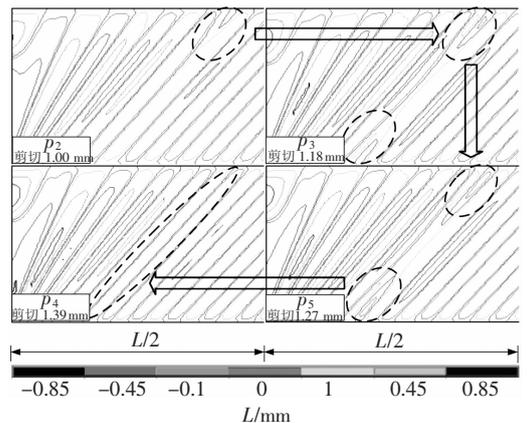


图7 二次屈曲过程

3.2 连续二次屈曲

对于不同的初始缺陷, 在大范围的后屈曲过程中薄膜可能出现连续的二次屈曲现象, 通过下面的例子可以说明.

在上述的分析过程中, 当剪切距离为 1 mm 时薄膜中将产生 24 个褶皱, 然后改变加载方式, 固定薄膜上边缘 x 方向的自由度, 并施加 y 方向的张拉作用, 张拉至 0.5 mm. 分析其张拉阶段的后屈曲过程. 图 8 为薄膜上 3 045 节点 N 在张拉阶段的后屈曲平衡路径(横坐标轴为 y 方向的张拉作用力). 从图上可以看出其后屈曲过程中出现了两次二次屈曲现象, 即 AB 点之间和 CD 点之间. $ABCD$ 点对应的薄膜面外变形等高线如图 9 所示. 从图上可以看出, 这种二次屈曲首先在边界上产生, 然后随着加载过程的延续向中心扩展, 产生新的褶皱.

从图 8 中也可以看出, 在二次屈曲过程中(AB 段曲线及 CD 段曲线), y 方向的张拉作用力稍有下降, 说明在二次屈曲发生的过程中结构是不稳定的.

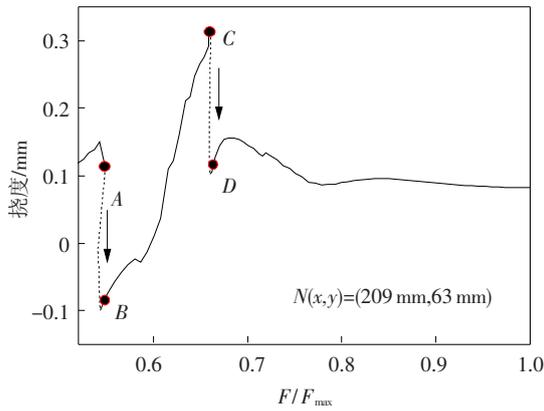


图 8 后屈曲平衡路径

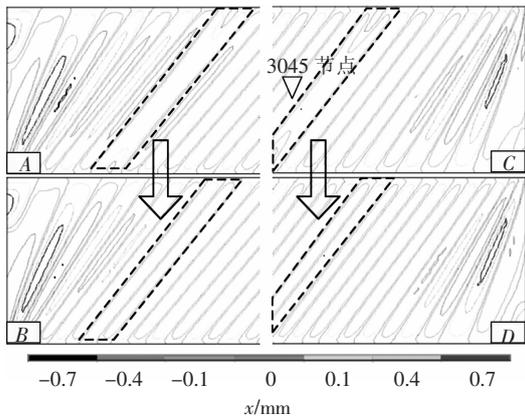


图 9 二次屈曲构形

4 结 论

本文建立了薄膜二次屈曲的分析模型和分析流程, 并分析了具有任意初始缺陷的薄膜二次屈曲现象. 结果表明, 由于初始缺陷的存在, 薄膜的后屈曲过程中褶皱模式不稳定, 出现了二次屈曲现象. 薄膜的平衡路径呈现多阶段的特点. 在不同加载方式下, 二次屈曲过程中结构可能是稳定的, 也可能是不稳定的, 并且在薄膜中会出现连续的二次屈曲现象.

参考文献:

- [1] STEIN M. Loads and deformation of buckled rectangular plates[R]. Washington: National Aeronautics and Space Administration, 1959.
- [2] KELLER H B, REISS E L. Nonlinear bending and buckling of circular plate[C]//Proc 3d, U. S. Nat Cong Appl Mech. [S. l.]: American Society of Mechanical Engineers, 1958:375-385.
- [3] STOLL F, OLSON S E. Finite element investigation of the snap phenomenon in buckled plates[C]//Proceedings of the 1997 38th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Kissimmee: [s. n.], 1997: 2703-2712.
- [4] CHAI H. On the post-buckling behavior of bilaterally constrained plates[J]. International Journal of Solids and Structures, 2002, 39:2911-2926.
- [5] CHAI H. Contact buckling and postbuckling of thin rectangular plates[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2001, 49:209-230.
- [6] TIWARI N, HYER M W. Secondary buckling of compression-loaded composite plates[J]. AIAA Journal, 2002, 40:2120-2126.
- [7] 王长国, 杜星文, 万志敏. 薄膜褶皱的非线性屈曲有限元分析[J]. 计算力学学报, 2007, 24(3):269-274.
- [8] 李云良, 谭惠丰, 王晓华. 矩形薄膜和充气管的屈曲及后屈曲行为分析[J]. 航空学报, 2008, 29(4):886-892.
- [9] LI Yunliang, TAN Huifeng, WANG Changguo, et al. Membrane buckling patterns and secondary buckling analysis[J]. International Journal of Space Structures, 2008, 23(3):183-191.

(编辑 张 宏)