蛋壳夹芯结构的变形机制及力学性能

焦洪杰 张以都 陈五一 张洪伟

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘 要: 从结构仿生的观点出发,提出了"孔壳夹芯结构"模型,通过模拟样件试验,归纳出了"孔壳夹芯结构"的压缩变形机制,得出"蛋壳夹芯结构"的承载能力主要取决于"蛋壳"的材料、结构尺寸和排列角度等因素的结论. 应用薄壳理论,算出了"蛋壳"单元在承受均布压力情况下的屈曲临界压力,同时,对"蛋壳"单元建立有限元模型,进行了静力学和屈曲模态分析,为进一步的"蛋壳夹芯结构"的工程轻量化设计提供了理论依据.

关 键 词: 蛋壳夹芯结构; 结构仿生; 屈曲临界载荷

中图分类号: TN 82; TH 123.3

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2009)02-0205-04

Distortion mechanism and mechanics performance of eggshell-like gore structure

Jiao Hongjie Zhang Yidu Chen Wuyi Zhang Hongwei

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: From the point of structure biomimetic, the model of eggshell-like thin core structure was put forward. From the test of model, the press distortion mechanism was concluded and the carrying capacity of egg-like thin shell core structure was depended on material, size and form angle. Applying thin shell theory, buckling critical load of eggshell-like under action of press load was counted out. In addition, limit element unit model was built up and mechanism and buckling mode were analyzed. The theory basis for weight reduction design was provided in engineering in future.

Key words: egg shell-like core structure; structure biomimetic; buckling critical load

许多天然生物结构材料,如木材及骨骼等,都是多孔结构材料,且可长期承受很大的动态和静态载荷,生物体的优异性能是功能、结构和材料在环境约束条件下长期进化、优化的结果,充分体现了自然进化的趋势,用尽量少的材料实现最大的功能[1]. 模仿天然多孔材料的结构特征,人们制造出了多孔固体及夹层复合材料. 由于多孔固体及夹层结构具有高比强度、比刚度及整体轻量化的特性,因此,使得此类结构广泛应用于航空、航天、建筑及机械等工程领域.

受生物结构启发或模仿生物特性结构而设计的材料成为结构仿生材料. 从这个意义上,人工多孔固体和蜂窝夹芯材料都属于结构仿生材料. 人工多孔固体,在工程制备时,孔隙率能够控制,但孔大小尺寸的均匀性及排列的一致性很难控制. 蜂窝夹芯结构主要是应用在提高结构件的比抗弯能力场合[2-3]. 另外,工程中大量使用承受压力载荷的支柱类器件. 当同时要求承载能力大且质量较轻时,就需设计出比抗压强度、刚度大的新型结构.

天然材料孔壳的几何形状和特性具有耐人寻味和启迪创造性思维的作用. 鸟蛋壳是自然界中用最少材料造就坚固结构的范例之一,是结构仿生的优异原型. 壳体,特别是封闭孔壳,主要靠曲面内的内力承载,所以节省材料. 为了能更好地利用特定仿生结构的特性,本文首先提出了宏观结构仿生"孔壳夹芯结构"的概念,结构由孔壳、填料、外面板组成. 当孔壳外形为鸟蛋形状时,定义

收稿日期: 2008-07-20

作者简介: 焦洪杰(1963—),男,安徽濉溪人,高级实验师,Hj_jiao@buaa.edu.cn.

为蛋壳夹芯结构.此结构中,“蛋壳”单元在很大程度上将影响和决定整体结构的力学性能.因此,有必要对“蛋壳”结构与刚度、受力与变形及稳定性关系进行深入的研究.

1 孔壳夹芯结构的基本力学性能

1.1 孔壳夹芯结构试件的模拟实验

自然界的多孔材料,如支撑树木的木材或赋予动物以轻质、刚硬构架的网状骨质,其主要功能在力学方面.孔壳夹芯结构中,孔壳形状、尺寸、排列方式及位置角度,不仅影响孔壳夹芯结构的力学性能,而且直接决定结构的轻量化效果.实际上,孔壳可以有多种排列方式,定义结构中所有孔壳占据的体积与结构总体积的比率为占空率.分析知,其值愈大,结构轻量化效果愈好,当孔壳交叉叠层排列时,如图1所示,占空率最大.

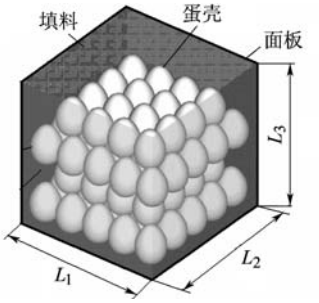


图1 夹芯结构示意图

分别用“生鸡蛋”和“乒乓球”作为孔壳,铝屑拌胶作为填料,薄塑料板作为面板制作了孔壳夹芯结构试件,试件加载前,孔壳与填料为压实状态.实验原理如图2所示.

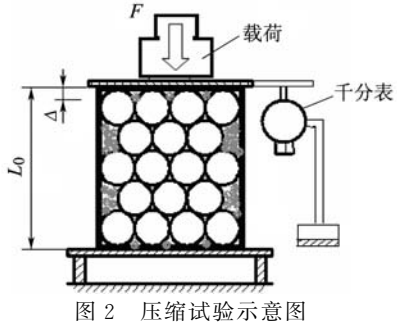


图2 压缩试验示意图

孔壳夹芯结构的受压基本力学性能可用其压缩应力与应变的关系定性说明.模拟实验观察到:随着载荷逐渐增加,孔壳变形也缓慢增加(乒乓球大,鸡蛋小);然后是孔壳出现凹陷(乒乓球)和裂陷(鸡蛋);再就是孔壳整体塌陷(乒乓球)和压碎(鸡蛋),表现为压力增加幅度并不大;最后,压力较大增加,孔壳逐渐密实.σ与ε的关系如图3所示.

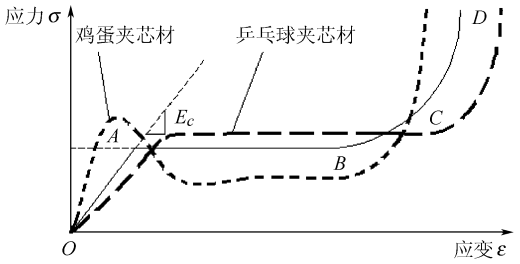


图3 孔壳夹芯结构的压缩应力-应变曲线图

1.2 孔壳单元压缩变形机制

根据模拟实验知,孔壳夹芯结构受压时的变形可用孔壳单元说明,主要取决于孔壳材料、形状、厚度、大小、排列方式及孔壳占空率等.在应用范围内,假设孔壳各向同性,且满足线弹性关系.

结构中孔壳是封闭的,壳壁可弯曲、延伸或收缩.壳壁面发生延展,可增加轴向孔壁刚性对弹性模量的贡献.如果孔壁不发生断裂,孔内如有介质(如液体)的压缩,也会提高其刚性.因此,孔壳夹芯结构单元孔壳的压缩变形机制为“壳壁弯曲+壳壁收缩和延伸+壳内介质的压缩”,其模型如图4所示.

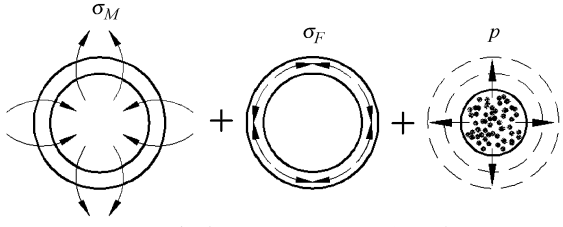


图4 孔壳单元的压缩变形机制示意图

在低应力下表现为线弹性,然后是一个较长的坍塌平台,最后为应力快速增高的密实化区.

2 “蛋壳”夹芯结构单元基本参数

自然鸟蛋壳,相当于一个曲线(母线)绕一轴线旋转而形成.因为蛋壳的中部是受力危险部分,并且其厚度变化不大,所以在结构仿生时,取蛋壳中部的平均厚度.由于蛋壳的厚度远小于壳的最小曲率半径,因此可以当作薄壳来研究,采用薄壳理论来求解壳中应力和内力.几何上,曲壳面的法线与旋转轴之间的夹角φ称为该点的纬度.通过该点的经向平面与基准面之间的夹角θ,称为该点的经度.

鸟蛋母线为圆滑过渡的曲线,数学表示较复杂.工程中,进行结构仿生设计时,可将“蛋壳”简化为小端、大端半径分别为$R_{\min}$和$R_{\max}$的圆球壳,中部为支持两端轴压作用的圆锥壳.顶角为2Ω,“蛋壳”均厚t.

3　“蛋壳”夹芯结构力学解析计算

3.1　轴向受压“蛋壳”夹芯结构的破坏形式

当“蛋壳”夹芯结构承受轴向压缩载荷达到一定值时，结构将产生破坏，可能形式包括整体屈曲、面板皱曲、面板塌陷和夹芯“蛋壳”屈曲等，前 3 种形式在很多文献有论述[3-4]，第 4 种屈曲研究极少，应深入研究.

3.2　夹芯“蛋壳”单元的临界荷载解析计算

假设“蛋壳”夹芯结构在某一工作状态时，单元“蛋壳”长轴倾斜与垂直方向夹角为 α，结构上部承受压力载荷 F 垂直向下，均匀分布在上部表面，压强为 $p=\dfrac{F}{S}$（S 为上部面积），通过夹芯保持层介质传递到“蛋壳”上，如图 5 所示.

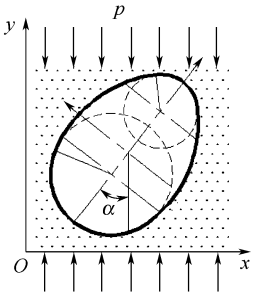


图 5　“蛋壳”单元受载位置示意图

“蛋壳”长轴方向分布压力：$p_a=p\cos\alpha$

短轴方向分布压力：$p_b=p\sin\alpha$

根据壳体力学理论[5-6]，

经线方向压应力：$\sigma_\theta=\dfrac{pR_e\cos\alpha}{2t}$

临界压力：$\sigma_{\theta c}=\dfrac{K_\theta Et\cos^2\Omega}{R_e}$

纬线方向压应力：$\sigma_\varphi=\dfrac{pR_e\sin\alpha}{t}$

临界压力：$\sigma_{\varphi c}=\dfrac{K_\varphi E}{1-\upsilon^2}\left(\dfrac{t}{R_e}\right)\cos\Omega$

式中，$R_e=\dfrac{1}{2\cos\Omega}(R_{\min}+R_{\max})$ 为折算半径；$K_\theta=\dfrac{1}{\sqrt{3(1-\upsilon^2)}}$；$K_\varphi=\dfrac{2}{\sqrt{3(1-\upsilon^2)}}$，为锥壳和球壳的计算系数；$E$ 为弹性模量.

由于薄壳受两方向应力，薄壳发生屈曲时，$\left(\dfrac{\sigma_\theta}{\sigma_{\theta c}}\right)^2+\left(\dfrac{\sigma_\varphi}{\sigma_{\varphi c}}\right)^2=1$，定义计算系数

$$K_1=\left(\frac{1}{2K_\theta\cos^2\Omega}\right)^2 \qquad K_2=\left(\frac{1-\upsilon^2}{K_\varphi\cos\Omega}\right)^2$$

得到临界压力：$p_c=\dfrac{E}{\sqrt{K_1\cos^2\alpha+K_2\sin^2\alpha}}\cdot\dfrac{t^2}{R_e^2}$

p_c 与 α 的关系，如图 6 所示.

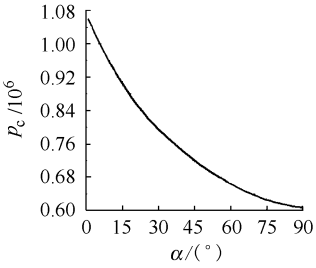


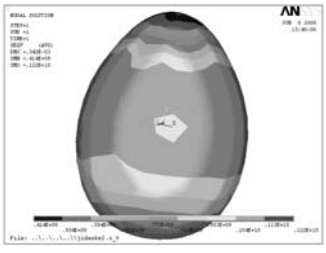
图 6　p_c 与 α 的关系曲线

4　“蛋壳”单元的性能仿真分析

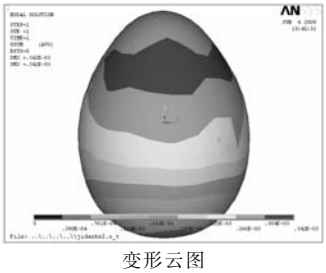
取出“蛋壳”夹芯结构中的一个单元“蛋壳”建立三维模型，采用 ANSYS10.0 进行有限元分析，薄壳选用 shell181 单元. 设计钢质蛋形薄壳，材料属性为：泊松比 $\upsilon=0.288$，弹性模量 $E=2.11\times10^9$ Pa，密度 $\rho=7\ 800$ mg/m^3，尺寸为：$R_{\min}=12$ mm，$R_{\max}=16$ mm，$t=0.5$ mm，$\Omega\approx15°$.

4.1　静力学分析

在“蛋壳”大端底部施加约束，在上部小端施加均布压力 $p=1.8$ MPa，可得到“蛋壳”单元静力分析结果，用等效应力云图和变形云图表示，见图 7.



等效应力云图



变形云图

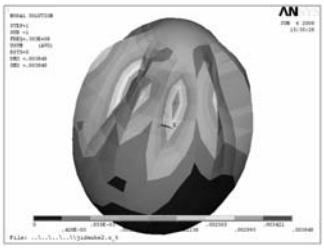
图 7　顶面均布载荷

从图中可以看出，当蛋壳上部作用均布载荷时，应力较大区为“蛋壳”中部，而应变较大区为“蛋壳”的中上部，所以，在进行“蛋壳”夹芯结构仿生设计时，要根据工程实际载荷情况，加强薄弱环节（如应力较大区适当变厚），以提高整体承载能力.

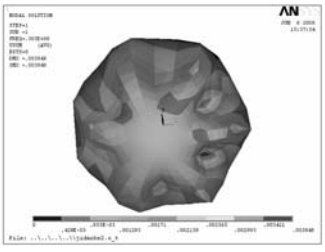
4.2　屈曲模态分析

对“蛋壳”进行线弹性屈曲分析，在“蛋壳”大端底部施加约束，在上部小端施加单位载荷，可计

算得到“蛋壳”的屈曲模态，如图8所示. 屈曲在“蛋壳”中部较大，与理论分析基本一致.



正视



俯视

图8 均匀压强一阶屈曲模态示意图

5 结 论

1）封闭孔壳夹芯结构的压缩变形机制为孔壳壁的弯曲、收缩和延伸组成，孔壳内包含液体等介质时，伴随有介质的压缩；

2）在小载荷低应力区，“孔壳夹芯结构”的压缩应力与应变基本满足线弹性关系；

3）“孔壳夹芯结构”在承受压力载荷时，基本力学性能主要由其中“孔壳”的材料、结构尺寸及排列放置角度等决定；

4）“蛋壳”壁厚的增加或两端曲率半径的减小，都可使屈曲临界压力增大，即提高“蛋壳夹芯结构”的承载能力，但从结构轻量化角度，壁厚不应太大；

5）当“蛋壳”长轴方向与外载压力方向相同时，屈曲临界压力最大，即“蛋壳夹芯结构”承载能力最大；

6）“蛋壳夹芯结构”是对天然多孔结构材料微观组织的宏观仿生实现，可以体现生物结构某些优异特性，实现工程结构的轻量化.

参考文献（References）

[1] Lu Yongxiang. Significance and progress of bionics[J]. Journal of Bionics Engineering, 2004,1(1):1－3

[2] Domack M S, Baughman J M. Development of nickel-titanium graded composition components[J]. Rapid Prototyping Journal, 2005,11(1): 41－51

[3] Noor A K, Burton W S, Charles W B. Computational models for sandwich panels and shells[J]. Applied Mechanics Review, 1996, 49(3): 155－199

[4] Liang C C, Chen H W. Optimum design of fiber-reinforced composite cylindrical skirts for solid rocket cases subjected to buckling and overstressing constraints[J]. Composites Part B: Engineering, 2003, 34: 273－284

[5] Zhang Jianzhong, Wang Jiugen, Ma Jiaju. Porous structures of natural materials and bionic design[J]. Journal of Zhejiang University: Science, 2005,6A(10):1095－1099

[6] Wang Tsun Kuei. The stability of composite laminated conical shells under axial andexternal pressure[C]//International Conference on Advancesin Structural Testing, Analysis and Design. Bangaloar, lndia:[s. n.],1990,29