

考虑界面蠕变效应的层合壳结构的力学响应

雷庭杰, 严蔚*, 吕田碧, 职君静

(宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 采用三维有限元方法分析了考虑界面蠕变效应的斜交铺设层合壳结构的力学响应, 引入带阻尼弹簧单元模拟 Kelvin-Voigt 黏弹性界面. 与其他学者的解析解结果作对比研究, 验证了该有限元层合壳模型的有效性和准确性. 进一步研究表明, 由于层间界面的蠕变效应, 层合壳结构的力学响应随时间发生显著变化; 同时, 随着时间推移, 结构的承载力和整体刚度明显下降, 因此在将来的层合结构设计过程中应充分考虑弱界面的影响.

关键词: 有限元; 层合壳; 黏弹性界面; 力学响应

中图分类号: O343.2; TU312

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2018) 02-0063-05

随着科技的发展, 复合材料作为一种具有较强耐腐蚀性、高强度等优点的新型材料, 已被广泛应用于航空航天、机械和土木工程等领域^[1-3], 在现代工业的发展过程中发挥着举足轻重的作用. 但复合材料层合结构在实际使用中经常产生诸如剥离、滑移、弱化等常见的失效现象, 这些缺陷最终可能导致结构损伤甚至破坏, 所以层合结构的界面弱黏结问题已成为威胁结构安全的一种主要因素. 因此, 越来越多的学者对层合结构的力学性能进行了研究, 并取得较多成果^[4-5].

层合壳是几种主要的层合结构形式之一, 许多学者对此开展了深入的研究. Ren^[6]对具有完美界面的层合壳进行了精确求解, 并导出了弹性力学解析解. Cai 等^[7]运用分层近似理论得到了含弱界面的层合圆柱壳结构的力学响应. Yan 等^[8]运用状态空间法和变量变换法, 并结合 Taylor 级数展开对含弱界面的层合圆柱壳进行了研究. 但这些求解方法大都是从层间本构关系出发, 构建界面模型来计算解析解, 只能针对具有特殊边界条件(如两端简支), 且几何形状规则的结构, 对于更具一般意义的结构形式则不适用.

本文充分考虑结构层间界面的物理特征, 构造合适的有限元单元, 并引入含阻尼弹簧单元模

拟带有时间效应的 Kelvin-Voigt 黏弹性界面, 从而得到依赖于时间变量的力学响应.

ANSYS 是有限元分析领域应用较早的计算机软件, 能进行多物理场分析, 并可分析较大型的实体结构, 对于复杂的大型工程实例分析具有较高的应用价值^[9]. 采用 ANSYS 三维有限元分析复合材料是一种较为重要的方法, 它能够精确快速地求解和分析, 从而设计出安全可靠的结构.

本文采用 ANSYS 12.0 软件, 构建含有铺层的实体结构有限元模型, 首先分析 3 层等厚度完美界面圆柱壳, 并与其他学者的结果作对比, 分析有限元方法的准确性与可行性; 进而建立 5 层斜交铺设的圆柱壳有限元模型, 其层间界面为多种不同的黏结状况, 在考虑蠕变效应的情况下研究不同界面特性对结构应力和位移分布的影响.

1 三层等厚度圆柱壳分析及对比

选用 SOLID185 单元构建 3 层等厚度完美界面圆柱壳模型, SOLID185 单元用于实体结构的模拟, 每个单元都有 8 个节点, 在三维实体单元中每个节点有 3 个方向的平移自由度. 可以构建层合结构有限元模型. 多层等厚度斜交铺设层合结构几何参数如图 1 所示. 考察结构为 3 层, 即取图 1 中层合

收稿日期: 2017-04-03.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journal.g.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金 (51678310).

第一作者: 雷庭杰 (1991—), 男, 河南驻马店人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 防灾减灾工程及防护工程. E-mail: leitngjiely@foxmail.com

*通信作者: 严蔚 (1968—), 男, 浙江宁波人, 博士/教授, 主要研究方向: 智能材料与结构力学. E-mail: yanwei@nbu.edu.cn

壳 n 为3,且坐标系选用柱坐标系 (r, θ, z) , r_0 为壳体的内径, r_n 为壳体的外径, h 为壳体径向厚度, θ_0 为圆心角.

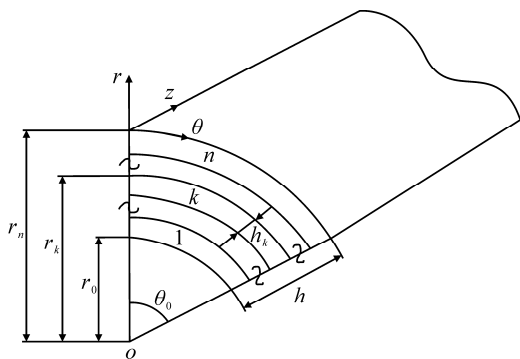


图1 层合圆柱壳

用CYLIND命令建立3层等厚度的圆柱壳,采用布尔运算把3个体黏结在一起,形成具有完美黏结界面的层合壳模型.层合壳为正交铺设,通过SECTYPE命令,定义3个SHELL铺层类型,并依次输入厚度和铺层角度,从圆柱壳内侧往外,铺层角度依次为 90° 、 0° 、 90° .圆柱壳的网格划分按等分圆心角度的方法,先将圆弧线分段,每一段所占的圆心角度为 1° ,每层分3段,采用VMESH划分为六面体单元.为保证铺层角度是铺层方向与单元坐标系 x 轴夹角,划分完后可通过EORIENT命令调节单元坐标系法线方向(本文采用单元坐标系法线与圆柱壳径向平行,单元坐标系 x 轴与圆柱壳 z 向重合).圆柱壳上的静荷载为正弦力 $p(\theta) = p_0 \sin(\pi\theta/\theta_0)$,取 $p_0 = r_0 c_{44}^{(1)} / r_n$.边界条件采用两边简支.材料常数为弹性模量 $E_x = 25 \times 10^9$ Pa, $E_y = E_z = 1 \times 10^9$ Pa; 剪切模量 $G_{xy} = G_{xz} = 0.5 \times 10^9$ Pa, $G_{yz} = 0.2 \times 10^9$ Pa; 泊松比 $\nu_{xy} = \nu_{yz} = \nu_{xz} = 0.25$,其中 x 为纤维的方向,即主方向, y 和 z 为垂直 x 方向.各参数计算公式为:

$$r_m = (r_n + r_0) / 2,$$

$$S = r_m / h,$$

$$c_{44}^{(1)} = 2 \times 10^8 \text{ Pa},$$

$$(\bar{\sigma}_\theta, \bar{\sigma}_z, w) = \left(\frac{\sigma_\theta}{p_0 S^2}, \frac{\sigma_z}{p_0 S^2}, \frac{10 E_y}{p_0 h S^4} u_r \right),$$

其中: r_m 是平均半径; S 为平均半径与厚度比; $c_{44}^{(1)}$ 为最下层材料弹性系数,由复合材料力学计算公式^[10]得出.

当 $S=10$ 时,得到的模型如图2所示,计算结果见表1.

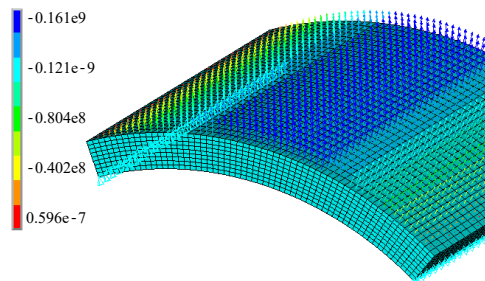


图2 三层完美黏结铺层圆柱壳模型

表1 对比三层等厚度完美界面铺层圆柱壳

S	方法	1	2	3	4	5
10	本文	0.144 065	0.010 718	0.010 761	0.993 355	0.894 210
	文献[6]	0.144 0	0.010 0	0.011 5	0.995 0	0.897 0
	文献[7]	0.144 290	0.009 949	0.011 472	0.994 880	0.897 210
	文献[8]	0.144 290	0.009 949	0.011 472	0.994 880	0.897 210
50	本文	0.080 828	0.008 101	0.007 797	0.797 512	0.782 070
	文献[6]	0.080 8	0.008 0	0.007 9	0.798 0	0.782 0
	文献[7]	0.080 828	0.007 982	0.007 931	0.798 220	0.783 110
	文献[8]	0.080 828	0.007 982	0.007 931	0.798 220	0.783 110
100	本文	0.078 501	0.008 106	0.007 715	0.785 819	0.778 041
	文献[6]	0.078 7	0.007 9	0.007 8	0.786 0	0.781 0
	文献[7]	0.078 576	0.007 866	0.007 816	0.786 560	0.779 120
	文献[8]	0.078 576	0.007 866	0.007 816	0.786 560	0.779 120

求解类型为静态分析,对模型进行求解分析,考虑 $S=10, 50$ 等不同几何参数所对应的情况.图3为当 $S=10$ 时的径向应力云图.求解结果见表1.从表1可以看出,当 $S=10$ 时,误差在1%左右, S 越大误差越小,表明用本文方法得出的结果与其他文献得出的结果吻合很好.进而表明本有限元模型的有效性和准确性,可以进一步应用到较为复杂的结构体系.

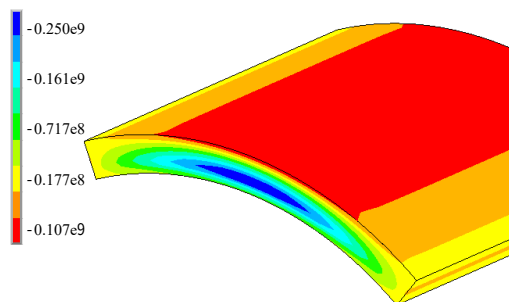


图3 $S=10$ 时径向应力云图

2 含弱界面五层斜交铺层圆柱壳

考察一含弱界面5层斜交铺层圆柱壳. 材料参数、静荷载与边界条件与上述算例同, 平均半径与厚度比取 $S=4.5$, $r_0=4$, $r_n=5$, 圆心角取 60° . 模型如图4所示.

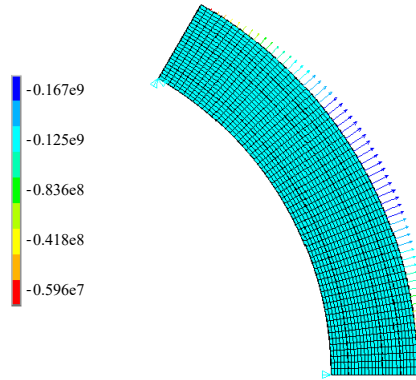


图4 5层斜交铺设层合壳模型

从圆心内侧到外侧铺设的角度依次为 70° 、 -30° 、 45° 、 -70° 、 60° . 坐标系采用柱坐标系统. 考虑层间弱黏结, 其中第1和第4界面为黏弹性界面, 第2界面为完美界面, 第3界面为具有流体特性的黏性界面.

层间弱界面模拟采用 COMBIN14 单元, 为 ANSYS 中应用较为广泛的带阻尼弹簧单元. 常应用于一维、二维或三维模型中, 具有轴向或扭转的性能. 其轴向拉伸弹簧如图5所示, 由一个弹簧常数 K 和阻尼系数 C_V 组成, 这里用 K 和 C_V 来模拟界面的线性弹性变形和黏性变形. 在添加界面弹簧时要注意, 由于是对界面重合节点添加弹簧单元, 所以要对界面节点用 nrotat 命令进行旋转节点坐标系, 使弹簧单元在柱坐标系统中. 各个层间损伤的弹性系数和黏性系数见表2. 经复合材料力学公式计算^[10], 得 $c_{44}^{(1)}=2.3509 \times 10^8$ Pa.

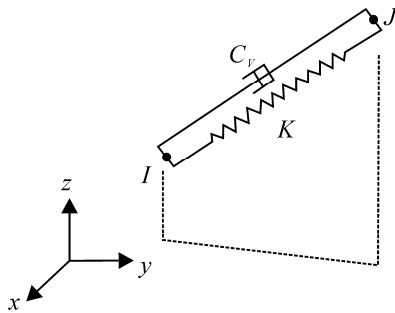


图5 Combin14 单元简图

表2 各界面参数^[8]

界面	特性	线弹性常数	阻尼参数
第1界面	黏弹性	$\eta_{0i}^{(1)}$	$\eta_{1i}^{(1)}$
第2界面	完美黏结	-	-
第3界面	黏性	-	$\eta_{1i}^{(3)} = \eta_{1i}^{(1)}$
第4界面	黏弹性	$\eta_{0i}^{(4)} = \eta_{0i}^{(1)} / 2$	$\eta_{1i}^{(4)} = 2\eta_{1i}^{(1)}$

注: $i=\theta, z$; r 向为刚度无限大; $\eta^{(k)}$ 表示第 k 层.

弹性常数 $\eta_{0i}^{(1)} = 2c_{44}^{(1)} / r_0 = 0.6875 \times 10^8 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-1}$, 黏性系数 $\eta_{1i}^{(1)}$ (黏度)取 $5.8772 \times 10^{16} (\text{Pa} \cdot \text{s}) \cdot \text{m}^{-1}$, 求解时间和黏度有关, 得:

$$t = \tau \cdot \eta_{1i}^{(1)} r_0 / c_{44}^{(1)} = \tau \cdot 2.34 \times 10^8 \text{ s},$$

其中: τ 为无量纲时间.

在图6中引入新的无量纲坐标和无量纲变量:

$$\zeta = (r - r_0) / (r_n - r_0),$$

$$u_1 = u_\theta(0, r) c_{44}^{(1)} / (p_0 r_0),$$

$$u_2 = u_z(0, r) c_{44}^{(1)} / (p_0 r_0),$$

$$u_3 = u_r(\pi/6, r) c_{44}^{(1)} / (p_0 r_0),$$

$$\sigma_1 = \tau_{r\theta}(0, r) / p_0,$$

$$\sigma_2 = \tau_{rz}(0, r) / p_0,$$

$$\sigma_3 = \sigma_r(\pi/6, r) / p_0.$$

对5层斜交铺设的层合圆柱壳模型进行求解, ANSYS 求解类型为无密度的瞬态分析, 以此来忽略惯性项, 计算得出各个无量纲力学量沿壳体厚度方向的分布, 如图6所示. 当 $\tau=0$ 时各个力学量沿厚度方向未发生较剧烈的变化. 而当时间不断增加时, 各力学量都发生了较大的变化, 尤其在各个界面处. 从图6(a)和图6(b)可以看出, 由于黏弹性(或黏性)界面的存在, 无量纲量环向位移 u_1 和 z 向位移 u_2 在第2完美黏结界面是连续的, 而在其他界面处不连续. 当 $\tau=\text{inf}$ 时, u_2 中第4界面的滑移量比 $\tau=1$ 时小, 似乎是不合理的, 其实际原因是由于第3界面为黏性界面, 第4层结构下表面滑移较快, 导致该情况的发生. 从图6(c)可以看出, 径向位移分量也发生了较大变化, 这是由于弱界面导致结构整体刚度减小. 图6(d)和图6(e)显示了 $\tau_{r\theta}$ 和 τ_{rz} 剪切应力在各层的分布, 可以看出由于黏弹性或黏性界面的存在, 在 $\tau=\text{inf}$ 的长期荷载作用下, 各个层间界面剪应力分布都发生了较大变化, 在 $\zeta=0.8$ 的界面发生了明显的应力松弛, 且当黏性界面 $\zeta=0.6$ 时剪应力趋近于0, 当 $\zeta=0.2$ 时没有发生应

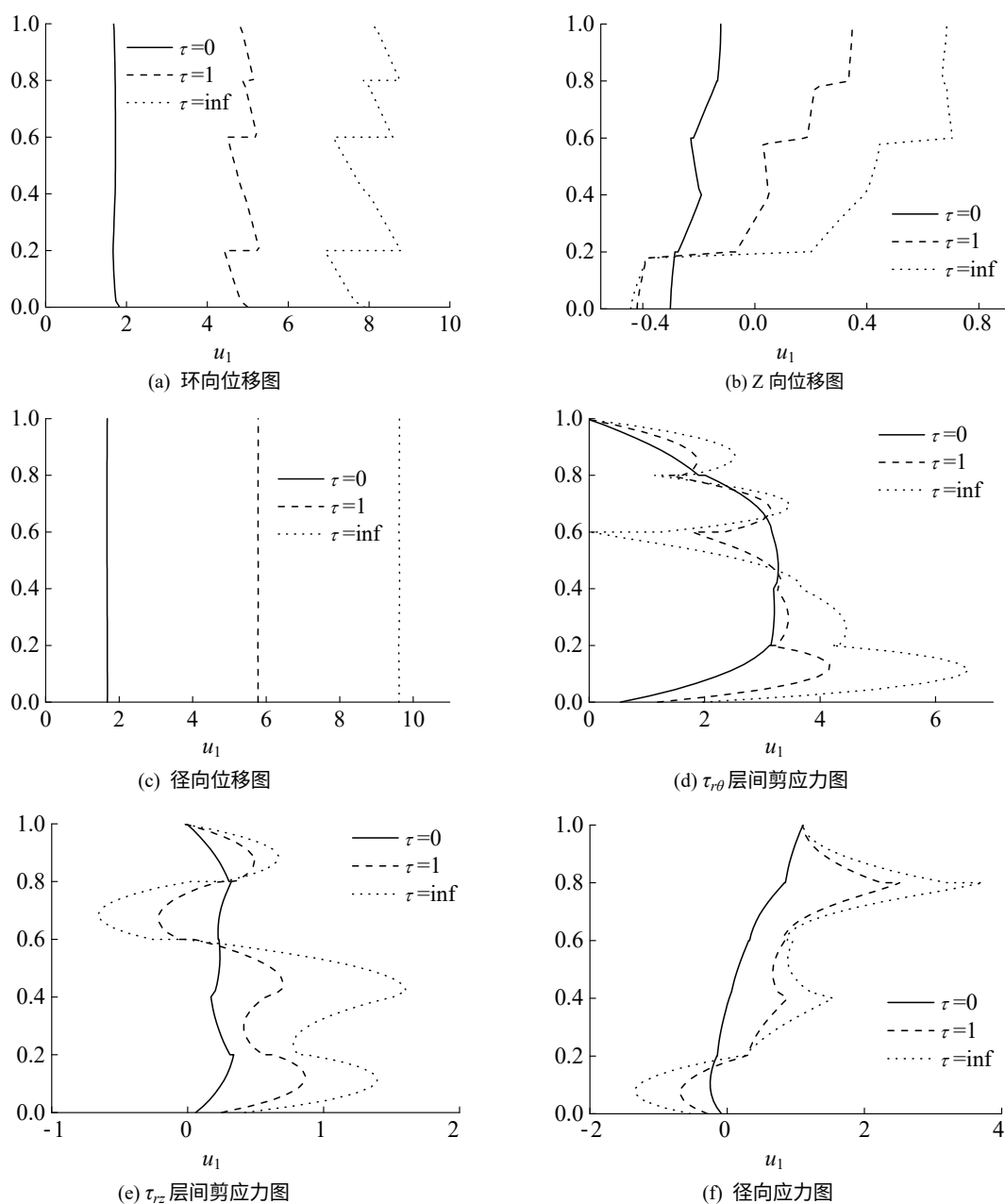


图6 沿壳体厚度方向各力学量的分布图

力松弛,这是由于荷载没有直接加载到下表面以及第2界面的完美黏结处,使得结构下侧的整体刚度较大.但由于弱界面的存在,可以直观地观察到,第1层壳体内 $\tau=inf$ 时的最大剪应力比 $\tau=0$ 时大2倍以上.由此可知,在层合结构的设计过程中要充分考虑弱界面对结构的影响.从图6(f)可知, σ_3 最大拉应力没有发生在整体结构的上表面,而是在第4黏弹性界面处,且分布曲线不可微,最下层壳体内应力为压应力,且发生在壳体内部.经分析是

因为界面处径向取无穷大刚度,切向和 z 向的刚度较小,作用时间越长,其径向的牵拉作用就越大,使得径向应力越来越大.

3 结语

本文采用 ANSYS 三维有限元方法构建了层合壳结构模型.首先分析了3层完美黏结层合壳结构,计算结果与其他学者的解析解进行了对比,结果是各项计算数据吻合度非常高,验证了本文方

法的可行性与准确性. 进一步考察层间为4种不同界面特性的5层斜交铺设层合壳, 通过计算发现, 随着时间的变化, 结构的弱界面有明显的层间滑移和应力松弛, 且由于弱界面的存在, 使得结构的整体刚度显著下降. 故在层合结构的设计过程中应充分考虑弱界面的影响.

同时, 通过有限元方法探究了含弱界面的斜交铺层圆柱壳结构, 引入含时间效应的弹簧单元模拟层间弱黏结. 该方法简单易行, 可以扩展到各种边界条件和几何形状复杂的结构体系, 弥补解析解的不足.

参考文献:

- [1] Chen W J, Chen J S, Cheng W B, et al. Status quo of research on impact damage of composites in aircraft[J]. Key Engineering Materials, 2016, 719:33-40.
- [2] Wu J, Yang X, Bai F. A micromechanical framework with aggregate-mastic interface effect for prediction uniaxial compression creep of asphalt mixture[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2014, 27(3):306-314.
- [3] Liang Y, Lancaster F, Izzuddin B A. Effective modelling of structural glass with laminated shell elements[J]. Composite Structures, 2016, 156:47-62.
- [4] Li Z M. Large-amplitude vibration analysis of shear deformable laminated composite cylindrical shells with initial imperfections in thermal environments[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2014, 140(3):552-565.
- [5] 职君静, 严蔚, 雷庭杰, 等. 长期荷载作用下含粘弹性界面层合板的力学行为[J]. 宁波大学学报(理工版), 2017, 30(1):77-81.
- [6] Ren J G. Exact solutions for laminated cylindrical shells in cylindrical bending[J]. Composites Science and Technology, 1987, 29:168-187.
- [7] Cai J B, Chen W Q, Ye G R. Effect of interlaminar bonding imperfections on the behavior of angle-ply laminated cylindrical panels[J]. Composites Science and Technology, 2004, 64:1753-1762.
- [8] Yan W, Ying J, Chen W Q. The behavior of angle-ply laminated cylindrical shells with viscoelastic interfaces in cylindrical bending[J]. Composite Structures, 2007, 78: 551-559.
- [9] Xiong H, Xi L U, Huang L. Simplified dynamic finite element analysis for three-dimensional pile-grouped-raft-high-rise buildings[J]. Key Engineering Materials, 2015 (400/402):613-619.
- [10] 张少实, 庄茁. 复合材料与粘弹性力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005:1-188.

The mechanical responses of a laminated shell with consideration of interfacial creep effects

LEI Ting-jie, YAN Wei*, LÜ Tian-bi, ZHI Jun-jing

(Faculty of Architectural, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: The three-dimensional finite element method is employed to investigate the mechanical responses of an angle-ply laminated shell by considering interfacial creep effects. A combined element including a dashpot and a spring is employed to simulate the Kelvin-Voigt viscoelastic interfacial relation. Comparison with existing analytical results by other researchers is conducted to validate the effectiveness and accuracy of the presented approach. The further study also shows that the mechanical behaviors of the laminated shell vary significantly according to the interfacial creep effects. In addition, the structural bearing capacity and the global stiffness decline evidently with time elapsing, which concludes that the imperfect interfaces should be considered carefully in the future laminate design.

Key words: finite element method; laminated shell; viscoelastic interfaces; mechanical responses

(责任编辑 史小丽)