

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.11.002

温湿环境反对称铺设圆柱壳结构的双稳态模型 与变形调控研究*

潘 豪, 柴国钟, 张 征*, 王昌明, 张焕青

(浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 浙江 杭州 310014)

摘要:针对双稳态复合材料结构在使用过程中会受到周围环境影响的问题,对作为一种新型双稳态复合材料结构的反对称铺设圆柱壳进行了温度和湿度影响下的双稳态模型研究。基于经典层合板理论和最小势能原理,建立了温度和湿度影响的双稳态理论模型,预测了反对称铺设圆柱壳结构的第一稳态扭曲率、第二稳态主曲率和扭曲率在温度和湿度影响下的变化情况。同时,采用有限元软件 ABAQUS 模拟得到了在不同温湿环境下突变过程(Snap-through 过程)的载荷一位移曲线、主曲率和扭曲率变化情况。理论和模拟结果均表明:两个稳态的扭曲率随温度或吸湿率的增加而增加,第二稳态主曲率和稳态转变载荷受吸湿率的影响较小,但受温度的影响较大。此外,验证了一种通过改变温度和吸湿率来调控两个稳态扭曲率的方法的可行性。

关键词:碳纤维复合材料;温湿环境;有限元法;反对称铺设圆柱壳;双稳态特性

中图分类号:TH123

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)11-1235-09

Hygrothermal effect on bistable model of anti-symmetric cylindrical shells and deformation control

PAN Hao, CHAI Guo-zhong, ZHANG Zheng*, WANG Chang-ming, ZHANG Huan-qing

(Key Laboratory of E&M., Ministry of Education & Zhejiang Province, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Aiming at bistable composite structures affected by the variation of the ambient environment, the model of anti-symmetric cylindrical shells as a novel kind of bistable composite structure under the effects of temperature and moisture was investigated. A theoretical model of bistable composite structures under the effects of temperature and moisture was developed on the foundation of the classical lamination theory and the minimum potential energy theory. The first stable twisting curvatures, the second stable main curvatures and twisting curvatures of anti-symmetric cylindrical shells under the effects of temperature and moisture were predicted by the theoretical model. The load-displacement curves in the snap-through process, the main curvatures and twisting curvatures with different temperature and moisture were obtained by the finite element software ABAQUS. According to the results of the theoretical analysis and finite element analysis, the results indicate that the twisting curvatures of anti-symmetric cylindrical shells in two different stable states increase with the temperature or moisture increasing. The main curvatures in the second stable state and snap loads are influenced slightly by the moisture, but influenced significantly with the temperature increasing. Besides, the feasibility of this method that is presented to active control the twisting curvatures in two stable states with the effects of temperature and moisture is validated.

Key words: carbon fiber composite; hygrothermal environment; finite element method; anti-symmetric cylindrical shells; bistable characteristic

收稿日期:2017-03-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51675485,11672269);浙江省自然科学基金资助项目(LY15E050016)

作者简介:潘 豪(1992-),男,浙江绍兴人,硕士研究生,主要从事可变形复合材料结构的研究。E-mail:842837134@qq.com

通信联系人:张 征,男,副教授,硕士生导师。E-mail:zhangme@zjut.edu.cn

0 引 言

双稳态复合材料结构作为一种新型的智能可变形结构,具有伸展和卷曲两种稳定状态,且在两种稳定状态下不需要外力维持^[1]。同时,它具有轻质、力学性能优异以及空间利用率高等一系列优良特性,这使其在智能可变形领域、能量收集领域具有广泛的应用前景,如可变形机翼及螺旋桨叶、可变形进气口等^[2]。然而,双稳态复合材料结构不可避免地受到周围环境的因素(例如温度和湿度等)的影响。

温度和湿度会影响纤维增强树脂基底复合材料的材料属性^[3]。碳纤维环氧树脂复合材料在不同温度下进行了材料属性试验,材料属性(如纵向弹性模量、剪切模量、主泊松比以及横向热膨胀系数等)会随着测试温度的升高线性减小。其余的材料属性(如横向弹性模量和纵向热膨胀系数)也会随之不断减小,但表现出明显的非线性^[4]。MAGID A 等人^[5]通过实验综合考虑载荷、温度和湿度因素对于玻璃纤维环氧树脂复合材料材料属性的影响,结果表明:持续的加载力和温湿环境作用会明显降低复合材料的强度和刚度。

双稳态复合材料结构主要由纤维增强复合材料制成,温度和湿度的因素则会影响双稳态复合材料结构的双稳态特性,其中双稳态特性通过双稳态复合材料结构在不同稳态时的形状尺寸以及不同稳态间的稳态转变过程体现。在温度影响方面,MOORE 等人^[6]研究了非对称正交铺设层合板的曲率与温度变化的非线性关系,模型考虑了随温度相关的材料属性,且采用结合理论分析和有限元建模方法进行对比研究,之后通过制备出非对称正交铺设层合板试件进行了实验验证,结果表明:非对称正交铺设层合板的曲率和扭曲率随着温度的升高不断减小,主要原因是由于高温固化过程产生的残余内应力的释放;在湿度影响方面,ETCHES 等人^[7]通过实验研究湿度对非对称正交铺设层合板双稳态特性(结构形状尺寸和稳态转变载荷)的影响,实验结果表明:湿度会显著地减小非对称正交铺设层合板的曲率和稳态转变载荷;PORTELA 等人^[8]通过有限元软件模拟压电复合材料驱动非对称复合材料层合板的稳态转变过程,同时模拟过程中考虑了湿度产生的影响,由模拟过程可知,湿度明显地减小压电复合材料所需的驱动力,其模拟结果通过实验得到了验证。

双稳态复合材料结构主要包括非对称正交铺设层

合板和反对称铺设圆柱壳等。非对称正交铺设层合板在冷却到室温后形成第一稳态的圆柱壳形状是由于各层复合材料单层板在材料主向与垂直于材料主向的横向有不同的热膨胀系数,以及临近层不同的铺设方式所形成的残余内应力产生。反对称铺设圆柱壳结构则是先在高温及高压环境的半圆柱形钢制模具中加工制备,然后在热压罐中钢制模具的支撑下冷却到室温得到。两者最大的区别是反对称铺设圆柱壳是在半圆形模具中保压下得到,而非对称正交铺设圆柱壳则是在平板形模具中制备冷却,之后由残余内应力诱发弯曲形成。相比于非对称正交铺设圆柱壳,加工制备得到的反对称铺设圆柱壳第一稳态的结构可以通过改变模具的尺寸来设计改变,从而有更多的初始结构尺寸可选择。对于反对称铺设圆柱壳结构,LOVETT D^[9]率先发现了反对称铺设圆柱壳结构的双稳态行为(结构具有两种稳定状态);之后,一个双参数模型被 GUEST 和 PELLEGRINO^[10]提出来简化之前的模型,该模型能够更好地描述反对称铺设圆柱壳不同稳态的行为;ZHANG 等人^[11]通过理论、有限元模拟和实验系统地研究影响反对称铺设圆柱壳结构双稳态特性的多种因素,考虑的影响双稳态特性的因素中包括反对称铺设圆柱壳的横截面曲率半径、铺设角、铺层数、纵向直边的长度和横截面圆弧的圆心角等。研究发现温度对于反对称铺设圆柱壳双稳态特性具有显著的影响^[12]。综上所述,温湿环境对复合材料材料属性和双稳态复合材料结构的双稳态特性造成显著的影响,所以反对称铺设圆柱壳结构在温湿环境下的模型研究具有重要的理论和实际意义。

本研究将对一种新型双稳态复合材料结构的反对称铺设圆柱壳进行温度和湿度影响下的双稳态模型研究。

1 理论分析

1.1 理论模型推导

1.1.1 经典层合板理论基础

反对称铺设圆柱壳的弯曲和拉伸应变能可以在经典层合板理论的基础上进行表述。反对称铺设圆柱壳需要满足经典层合板理论的基本假设:(1)复合材料层合板的各单层板之间牢固黏结,有一致的变形而无相对滑移;(2)各单层板近似认为处于平面应力状态;(3)复合材料层合板变形前垂直于中面的直

线,变形后作为直线仍垂直于变形后的中面,且直线长度保持不变,即符合直线不变假设;(4)平行于中面的横截面上的正应力相比其他应力相比很小,可以忽略不计。

同时考虑在线弹性的范围内,反对称铺设圆柱壳结构为铺设方式例如 $[\alpha/-\alpha/\alpha/-\alpha]$ 的复合材料层合结构。反对称铺设层合板的应力—应变关系表达式为:

$$\begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & 0 & 0 & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & 0 & 0 & 0 & B_{26} \\ 0 & 0 & A_{66} & B_{16} & B_{26} & 0 \\ 0 & 0 & B_{16} & D_{11} & D_{12} & 0 \\ 0 & 0 & B_{26} & D_{12} & D_{22} & 0 \\ B_{16} & B_{26} & 0 & 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon^0 \\ k \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: N, M —内力和内力矩; ε^0, k —中性面上的应变和曲率; A, B, D 矩阵—复合材料层合板的拉伸刚度矩阵、拉弯耦合刚度矩阵、弯曲刚度矩阵。

由反对称铺设方式的 ABD 矩阵可知, B 矩阵中 B_{16} 和 B_{26} 不为 0,说明存在拉弯耦合。而对于 D 矩阵中 D_{16} 和 D_{26} 都为 0,说明其不存在弯扭耦合。

而 A, B, D 矩阵的具体表达式为:

$$\begin{aligned} A &= \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{21} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{61} & \bar{Q}_{62} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k (z_k - z_{k-1}), \\ B &= \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{21} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{61} & \bar{Q}_{62} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \left(\frac{z_k^2 - z_{k-1}^2}{2} \right), \\ D &= \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{21} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{61} & \bar{Q}_{62} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \left(\frac{z_k^3 - z_{k-1}^3}{3} \right). \end{aligned}$$

式中: z_k —垂直于平面的 z 方向上距离中性面的距离; n —铺层数; $[\bar{Q}]$ —自然坐标系下单层板的刚度矩阵; $[\bar{Q}]$ 是 $[Q]$ 的转换矩阵; $[Q]$ —主向坐标系下单层板的刚度矩阵。

单层板在主向坐标系下包含刚度矩阵 $[Q]$ 的应力—应变关系表达式为:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中: $Q_{11} = E_1/1 - \nu_{12}\nu_{21}, Q_{22} = E_2/(1 - \nu_{12}\nu_{21}), Q_{12} = \nu_{12}E_2/(1 - \nu_{12}\nu_{21}) = \nu_{21}E_1/(1 - \nu_{12}\nu_{21}), Q_{66} = G_{12}$

1.1.2 温度和湿度影响的层合板刚度关系

复合材料单层板在温度和湿度环境中,材料主方向产生的应力为:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = Q \left(\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta T - \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta C \right) \quad (3)$$

式中: α_1, α_2 —材料主向和横向的热膨胀系数; β_1, β_2 —材料主向和横向的湿膨胀系数; $\Delta T, \Delta C$ —温度变化和湿度变化。

其中,吸湿率的计算方法为:

$$C = 100 \times (m_t - m_1)/m_1 \quad (4)$$

式中: m_t —浸泡在蒸馏水中时间 t 后试件的重量; m_1 —试件烘干后的重量。

由于在温度和湿度作用下不会产生剪应变, α_{12} 和 β_{12} 为 0。而温度和湿度影响的层合板应力—应变关系^[13]:

$$\begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N^T \\ M^T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N^H \\ M^H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon^0 \\ k \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中:

$$\begin{aligned} N^T &= \sum_{k=1}^n \bar{Q}_k \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_{xy} \end{bmatrix}_k \Delta T dz, \\ M^T &= \sum_{k=1}^n \bar{Q}_k \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_{xy} \end{bmatrix}_k \Delta T z dz, \\ N^H &= \sum_{k=1}^n \bar{Q}_k \begin{bmatrix} \beta_x \\ \beta_y \\ \beta_{xy} \end{bmatrix}_k \Delta C dz, \\ M^H &= \sum_{k=1}^n \bar{Q}_k \begin{bmatrix} \beta_x \\ \beta_y \\ \beta_{xy} \end{bmatrix}_k \Delta C z dz. \end{aligned}$$

式中: $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_{xy}$ —自然坐标系下的热膨胀系数; $\beta_x, \beta_y, \beta_{xy}$ —自然坐标系下的湿膨胀系数。

由温度和湿度产生的应变和曲率表达式为:

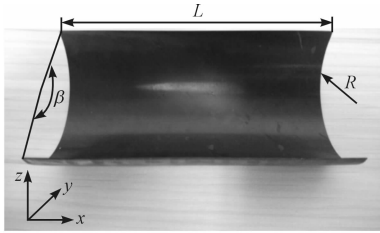
$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \varepsilon^T \\ k^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} N^T \\ M^T \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \varepsilon^H \\ k^H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} N^H \\ M^H \end{bmatrix} \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)可知温湿环境对于反对称铺设圆柱壳的

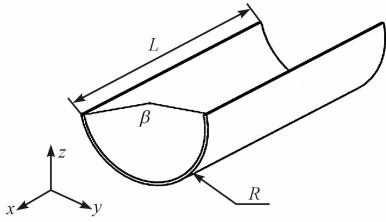
第一稳态结构形状尺寸产生的影响。同时,温湿环境影响下层合板的应力—应变关系可以代入给出的反对称铺设圆柱壳的理论模型中推导其在温湿环境下的理论模型。

1.1.3 温度和湿度影响的反对称铺设圆柱壳结构理论模型

反对称铺设圆柱壳结构的实物及几何模型具体如图 1 所示。



(a) 反对称铺设圆柱壳结构实物图



(b) 反对称铺设圆柱壳结构几何模型

图 1 反对称铺设圆柱壳结构实物及几何模型

L —反对称铺设圆柱壳在第一稳态时两纵向直边的长度; R —其在第一稳态时横截面的圆弧半径; β —其在第一稳态时横截面圆弧的圆心角

对于该理论模型,假设该结构在第一稳态伸展状态时初始无内应力,且在纵向上截取各个位置圆弧半径保持不变,即在第一稳态时,其是一个规则的半圆柱壳结构(例如第一稳态时的结构 $k_{x1} = 0, k_{y1} = 1/R$ 和 $k_{xy1} = 0$)。当其转变为第二稳态时,第一稳态纵向的直边变为圆弧边,同时其第一稳态横向的圆弧边变为直边,即第一稳态纵向的曲率转变为第二稳态横向的曲率。且理论上需要满足假设,两个稳态时的结构在各个方向各自保持一致的曲率。

对于温湿环境下反对称铺设圆柱壳的理论模型,需要在总应变能中考虑温度和湿度产生的影响。之后从能量的角度考虑,反对称铺设圆柱壳的两个稳态是处于温湿影响的总应变能的两个局部极小值,采用最小势能原理可以获取两个稳态的圆柱壳结构。反对称铺设圆柱壳结构的总应变能包括拉伸应变能和弯曲应变能,其中拉伸应变能密度 u_s 和弯曲应变能密度 u_b 可以表示为^[14]:

$$u_s = \frac{1}{2}(N_x \varepsilon_x^0 + N_y \varepsilon_y^0 + N_{xy} \gamma_{xy}^0)$$

$$u_b = \frac{1}{2}(M_x k_x + M_y k_y + M_{xy} k_{xy}) \quad (7)$$

把式(1)中的 $N_x, N_y, N_{xy}, M_x, M_y, M_{xy}$ 分别代入式(7)中,之后两者相加得到总应变能密度表达式 u :

$$u = \frac{1}{2}[A_{11} \varepsilon_x^2 + 2A_{12} \varepsilon_x \varepsilon_y + 2B_{16} \varepsilon_x k_{xy} + 2B_{26} \varepsilon_y k_{xy} + A_{22} \varepsilon_y^2 + (D_{11} + B_{16} B'_{61}) k_x^2 + (2D_{12} + B_{16} B'_{62} + B_{26} B'_{61}) k_x k_y + (D_{22} + B_{26} B'_{62}) k_y^2 + D_{66} k_{xy}^2] \quad (8)$$

其中:矩阵 $A' = A^{-1}, B' = -A^{-1}B$ 。

反对称铺设圆柱壳结构第一稳态为初始规则的半圆柱壳,所以主要预测第二稳态的结构。对于第二稳态的形状尺寸,令 k_{x2} 和 k_{y2} 分别为圆柱壳第二稳态 x, y 方向上的曲率, k_{xy2} 为圆柱壳第二稳态 $x - y$ 平面内的扭曲率。温度和湿度影响下的应变和曲率为: $\varepsilon_x = \varepsilon_x^0 + \varepsilon_x^T + \varepsilon_x^H, \varepsilon_y = \varepsilon_y^0 + \varepsilon_y^T + \varepsilon_y^H, k_x = k_{x2} - k_x^T - k_x^H, k_y = k_{y2} - 1/R - k_y^T - k_y^H, k_{xy} = k_{xy2} - k_{xy}^T - k_{xy}^H$ 。由于在第二稳态时, $\varepsilon_y^0 \approx 0$ 。代入式(8)的总应变能密度表达式 u 中,之后对整个横截面进行积分得到温度和湿度影响的应变能表达式 U 。而在第二稳态时, $k_{y2} \approx 0$, 温度和湿度影响下的应变能表达式 U 对 k_{x2} 和 k_{xy2} 进行求导,得到温度和湿度影响下的 k_{x2} 和 k_{xy2} 的表达式为:

$$\frac{dU}{dk_{x2}} = 0 \Rightarrow k_{x2} = \frac{(2D_{12} + B_{16} B'_{62} + B_{26} B'_{61})}{2(D_{11} + B_{16} B'_{61})} \left(\frac{1}{R} + k_y^T + k_y^H \right) + k_x^T + k_x^H$$

$$\frac{dU}{dk_{xy2}} = 0 \Rightarrow k_{xy2} = - \frac{B_{16}(\varepsilon_x^T + \varepsilon_x^H) + B_{26}(\varepsilon_y^T + \varepsilon_y^H)}{D_{66}} + k_{xy}^T + k_{xy}^H \quad (9)$$

由式(9)可知,在温度和湿度的影响下,反对称铺设圆柱壳结构在第二稳态存在扭曲率 k_{xy2} , 使其在第二稳态时不再具有规则的半圆柱壳形状。第二稳态曲率 k_{x2} 同样会受到温度和湿度的影响。

1.2 温湿环境下的材料属性

反对称铺设圆柱壳结构的材料属性会受温湿环境的影响。近些年的一系列研究结果表明,当温差变化较大时,考虑温度相关的材料属性对于复合材料结构的设计具有十分重要的意义。同样,也需要考虑湿度是否会对材料属性产生影响。目前已有学者考虑了碳纤维环氧树脂复合材料层合板的随温度相关和随湿度相关的材料属性,之后研究温度和湿度影响下层合板的动态分析^[15]。由其使用的材料属性可知,湿度对于复合

材料结构的影响相比温度的影响较小。此外,因为需要同时考虑温度和湿度的影响,实验较难测得不同温度,同时又不同湿度时的材料属性,本研究最终选用随温度相关,同时不随湿度相关的材料属性进行研究。研究所用的材料为 T700/ 环氧树脂复合材料,随温度相关的材料属性是通过上海高分子测试中心测得的 4 个特殊温度点的材料属性,之后通过曲线拟合得到材料属性随温度变化的曲线,拟合出的曲线表达式为:

$$\begin{cases} E_1 = (108.05 + 0.0235T - 0.00162T^2) \text{ GPa} \\ E_2 = (2.9191 + 22.069e^{-0.083567T}) \text{ GPa} \\ G_{12} = (5.9375 - 0.04053T - 5.625 \times 10^{-6}T^2) \text{ GPa} \\ \alpha_1 = (-2.2 + 0.0025T + 0.000125T^2) \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \\ \alpha_2 = (68.2833 - 0.1975T) \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \\ \nu_{12} = 0.31 \end{cases} \quad (10)$$

而关于湿度的材料属性的选择,本研究选取了常温的材料属性即式(10)中 $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$ 时的材料属性。当湿度改变时,材料属性不考虑随湿度的变化而变化。其中的纵向湿膨胀系数 β_1 和横向湿膨胀系数 β_2 通过文献获得,选取了典型的碳纤维环氧树脂复合材料的纵向湿膨胀系数 $\beta_1 = 0$, 及横向湿膨胀系数 $\beta_2 = 0.005 \text{ wt}\%^{-1}$ 。理论分析的对象为反对称铺设圆柱壳结构,其几何尺寸及铺设方式如表 1 所示。

表 1 反对称铺设圆柱壳结构的几何尺寸及铺设方式

铺设方式	纵向直边长度 L/mm	圆弧半径 R/mm	圆弧圆心角 $\beta/(\text{ }^\circ)$	单层厚度 th/mm
[45°/ - 45°/ 45°/ - 45°]	100	25	180	0.1

2 有限元模型

本研究通过有限元模拟软件 ABAQUS 研究反对称铺设圆柱壳结构考虑温湿影响的不同稳态的双稳态结构形状尺寸变化,同时也模拟温湿环境下圆柱壳结构的稳态转变过程。有限元模拟相比于理论分析的优点:可以利用有限元软件自带的几何非线性分析功能模拟整个稳态转变过程,同时可以捕捉和输出各个阶段的曲率和扭曲率信息。有限元模型中反对称铺设圆柱壳结构模型按表 1 进行建模,其所用的材料属性符合如式(10)所示随温度相关材料属性的方程和与湿度有关的材料属性。反对称铺设圆柱壳模型采用 S4R 壳单元(4 节点的缩减型壳单元),划分为 1 600 个网格单元,1 681 个节点。此外,本研究采用了一种两点机械

加载的方式来获取圆柱壳结构的两种稳态。模型中包括两个支撑板以及一个压头,都采用解析刚体进行建模,具体如图 2 所示。

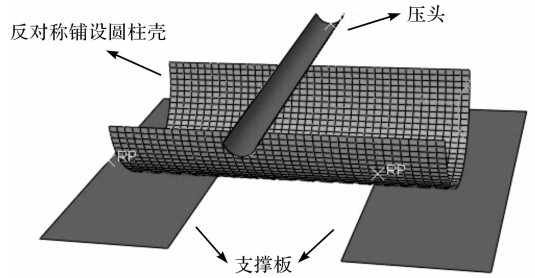


图 2 反对称铺设圆柱壳结构的有限元模型

模拟过程收敛需要一定的约束条件,两个支撑板可以限制圆柱壳结构垂直于支撑板平面方向(即加载方向)的位移,同时还需要对反对称铺设圆柱壳模型中心点限制除加载方向以外其余 5 个自由度的约束,模型中的压头可以模拟实际压头机械加载过程。

对于有限元模拟过程,本研究采用 4 个静态分析步进行分析。在起始步,设置初始的参考温度为环境温度 $20\text{ }^\circ\text{C}$,以及限制圆柱壳结构中心点除位移加载方向的位移自由度以外的 5 个自由度,本研究中 Y 方向为压头位移加载的方向,即($U1 = U3 = UR1 = UR2 = UR3 = 0$)。对于调整收敛的过程,其中的 5 个自由度约束可以适当调整来使模拟过程更易收敛。在第一个分析步,设置需要研究的温湿环境,并在之后的两个分析步中保持不变。在第二个分析步,需要设置压头加载位移的大小。在第三个分析步,设置压头返回到起始位置,即模拟卸载过程。温湿环境的影响和机械加载过程使圆柱壳结构都发生了较大的变形过程,因此需要在除了起始步以外都开启非线性大变形选项,即 Nlgeom 设置为 On,同时按照 ABAQUS 默认设置的 Automatic stabilization 功能来进行分析,为了使模拟过程更容易收敛。温湿环境下 Snap-through 过程的稳态转变过程如图 3 所示。

从状态(a)到状态(b)为加温度场和湿度场的过程,状态(b)到状态(c)及状态(d)为温湿环境下 Snap-through 过程的稳态转变过程,状态(d)到状态(e)为卸载过程。

由于有限元软件 ABAQUS 中有考虑温度场的模块而没有湿度场模拟的模块。对于加温和加湿过程,考虑加温度场比加湿度场容易实现。但是,加湿度的过程与加温度的过程在理论上具有相似性,采用等效的热膨胀系数的方法可以模拟温度和湿度同时作用的情

况。由式(3)可知,对于层合板某一层由于温度和湿度影响而产生的应变,之后进行转变得到:

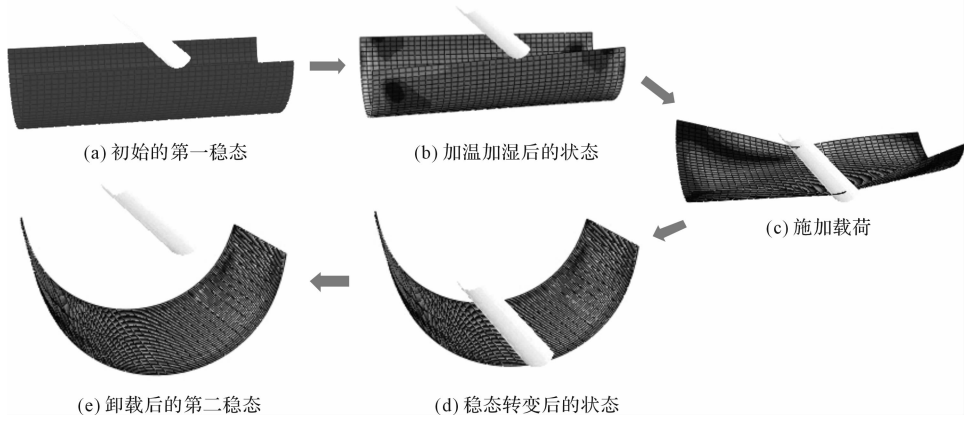


图 3 温湿环境下的 Snap-through 过程

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta T + \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta C = \left(\begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ 0 \end{bmatrix} \frac{\Delta C}{\Delta T} \right) \Delta T = [\alpha^*] \Delta T \quad (11)$$

式中: $[\alpha^*]$ —等效热膨胀系数,通过采用它可以考虑温度和湿度产生的应变。

具体地,反对称铺设圆柱壳结构的吸湿率 C 为从 $0 \sim 0.4$,周围温度 T 从 $20\text{ }^\circ\text{C} \sim 80\text{ }^\circ\text{C}$,则等效的热膨胀系数 $[\alpha^*]$ 的值为:

$$[\alpha^*] = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ 0 \end{bmatrix} \frac{\Delta C}{\Delta T} =$$

$$\begin{bmatrix} (-2.2 + 0.0025T + 0.000125T^2) \times 10^{-6} \\ (68.2833 - 0.1975T) \times 10^{-6} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.005 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \frac{0.4}{60} = \begin{bmatrix} (-2.2 + 0.0025T + 0.000125T^2) \times 10^{-6} \\ (101.6166 - 0.1975T) \times 10^{-6} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

把式(12)中的等效热膨胀系数代入有限元模拟中,同时设置温度变化的两个温度场,可以模拟该温度和吸湿率时的反对称铺设圆柱壳结构的稳态转变过程。

3 结果与讨论

温度和湿度会对反对称铺设圆柱壳结构产生影响,理论和模拟研究反对称铺设圆柱壳结构在温度和

湿度环境下两个稳态时的结构形状尺寸和两个稳态间的稳态转变过程。反对称铺设圆柱壳在不考虑温度和湿度等其他因素时,其在两个稳定状态下为两个规则的半圆柱壳结构,只需要测量两个稳态的曲率半径来描述其形状尺寸。而考虑温度和湿度等其他因素时,反对称铺设圆柱壳结构不再具有两个稳态时规则的结构形状尺寸,则需要通过 x 方向(即第一稳态纵向)的曲率 k_x , y 方向(即第一稳态横向)的曲率 k_y , 以及 $x-y$ 平面内的扭曲率 k_{xy} 描述。此外,有限元模拟可以捕捉反对称铺设圆柱壳结构在温湿环境下的稳态转变过程。本研究考虑了一种机械加载的方式进行反对称铺设圆柱壳结构的稳态转变过程。同时,由于反对称铺设圆柱壳结构在实际环境中湿度的增加相比温度的增加所需要的时间更久且更难测得,在进行温度和湿度对圆柱壳结构影响的研究时,保持温度不变改变湿度相比保持湿度不变改变温度更有利于研究。

3.1 温湿环境对于结构形状尺寸的影响

通过理论和模拟给出的在不同的温度时,吸湿率的增加对于第一稳态扭曲率 k_{xy1} 和第二稳态扭曲率 k_{xy2} 的影响分别如图 4(a ~ c) 所示。由图 4(a)、4(b) 和 4(c) 可知,第一稳态扭曲率 k_{xy1} 和第二稳态扭曲率 k_{xy2} 随着吸湿率的增加都不断线性增加。对比不同温度下的扭曲率 k_{xy1} 和 k_{xy2} 随吸湿率变化的曲线,反对称铺设圆柱壳结构在不同吸湿率时的第一稳态扭曲率 k_{xy1} 和第二稳态扭曲率 k_{xy2} 随着温度的提高都不断增加,但其斜率相比减小。在保持不同的温度下,即分别在图 4(a)、4(b) 和 4(c) 中,对比第一稳态扭曲率 k_{xy1} 和第二稳态扭曲率 k_{xy2} 随吸湿率变化的曲线可知,第二稳态扭曲率 k_{xy2} 更容易受到吸湿率变化的影响。由理论

和有限元模拟的结果对比可知,在温度和湿度对于第一稳态扭曲率 k_{xy1} 的影响上,两者对比误差较小。在温度和湿度对于第二稳态扭曲率 k_{xy2} 的影响上,两者趋势一致而在数值上存在一定的偏差。

图 4(d) 中通过理论和模拟的方法研究在不同的温度时,吸湿率的增加对于第二稳态主曲率 k_{x2} 的影响。图 4(d) 给出了在不同的温度下,第二稳态主曲率 k_{x2} 并不随吸湿率的增加而改变。当对比保持一定的吸湿率下第二稳态主曲率 k_{x2} 的关系时,第二稳态主曲率

k_{x2} 随着温度的增加不断增加。理论和有限元模拟的结果对比可知,两者在温度和吸湿率对于第二稳态主曲率 k_{x2} 的影响上趋势一致,但在数值上依旧存在一定偏差。第二稳态主曲率 k_{x2} 不随吸湿率变化的现象是由于理论和有限元模型中,对于材料属性中的纵向弹性模量 E_1 ,横向弹性模量 E_2 和剪切模量 G_{12} 主要考虑了随温度相关和不随湿度相关。理论和有限元结果都说明了湿膨胀系数的变化或吸湿率的改变并不会对反对称铺设圆柱壳结构第二稳态主曲率 k_{x2} 产生影响。

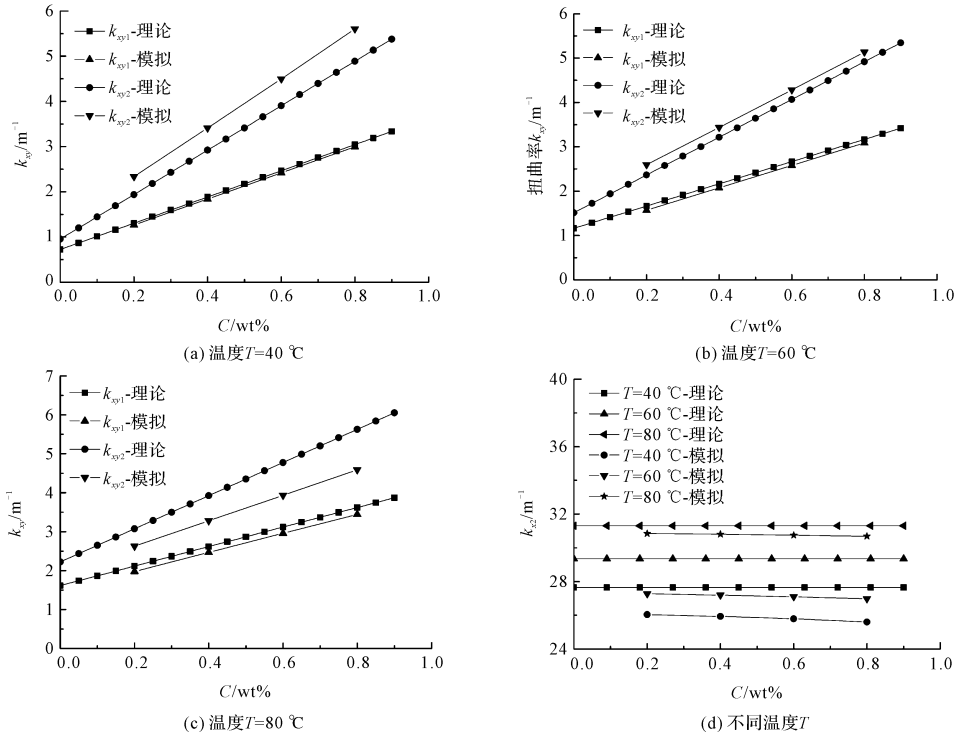


图 4 不同温度下湿度对曲率和扭曲率的影响

3.2 温湿环境对稳态转变的影响及结构综合影响的调控

本研究通过有限元软件模拟得到的不同温度和湿度下 Snap-through 过程的载荷—位移曲线如图 5 所示。

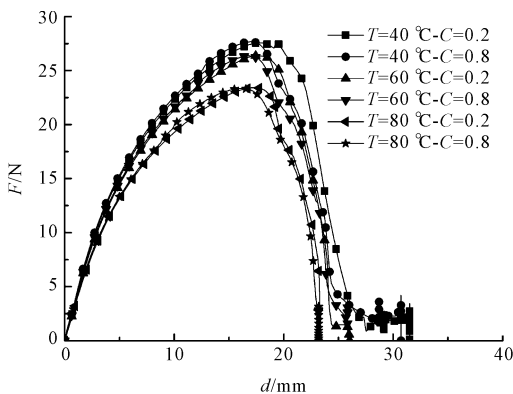


图 5 不同温湿环境下的载荷—位移曲线

其中,反对称铺设圆柱壳结构从第一稳态到第二稳态的稳态转变过程称为 Snap-through 过程。由图 5 可知,对于不同温度和吸湿率下的载荷—位移曲线,载荷都随着位移增加先不断增加到达最大值,之后迅速减小到零,其中载荷的最大值被称为稳态转变载荷。保持一定的吸湿率对比不同温度下的载荷—位移曲线得到,稳态转变载荷随着温度的升高不断减小,同时稳态转变所需要的位移也不断减小。对比保持在不同的温度下改变吸湿率,可以得到吸湿率对于稳态转变载荷和稳态转变所需的位移影响较小。图 5 中只列举了吸湿率为 0.2 和 0.8 的载荷—位移曲线,相似的规律仍然可以在吸湿率为 0.4 和 0.6 时得到,但在图中为了更清楚地表达并未呈现。对于随温度相关同时不随湿度相关材料属性的有限元模型,温度的改变会对反对称铺设圆柱壳结构的稳态转变产生显著的影响,但湿度的增加对反对称铺设圆

柱壳结构的稳态转变产生的影响较小。

根据式(6)和式(9)中给出的温度和湿度分别与第一稳态扭曲率 k_{xy1} 和第二稳态扭曲率 k_{xy2} 关系的理论表达式,可以得到反对称铺设圆柱壳结构的第一稳态扭曲率 k_{xy1} 和第二稳态扭曲率 k_{xy2} 随着温度或吸湿率的增加分别会随之增加。同时,有限元模拟过程中通过单因素变量的方法研究温度和吸湿率对第一稳态扭曲率 k_{xy1} 和第二稳态扭曲率 k_{xy2} 的影响。由有限元模拟的结果可知,反对称铺设圆柱壳结构的第一稳态扭曲率 k_{xy1} 和第二稳态扭曲率 k_{xy2} 随着温度或吸湿率的增加会随之增加。该有限元模拟的结果验证了理论上进行温湿调控扭曲率的方法,即通过提高温度和降低吸湿率调节扭曲率,或者通过提高吸湿率和降低温度来调节扭曲率。有限元模拟和理论分析的方法列举的改变温度 T 和吸湿率 C 进行对第一稳态扭曲率 k_{xy1} 和第二稳态扭曲率 k_{xy2} 的调控分别如图 6、图 7 所示。

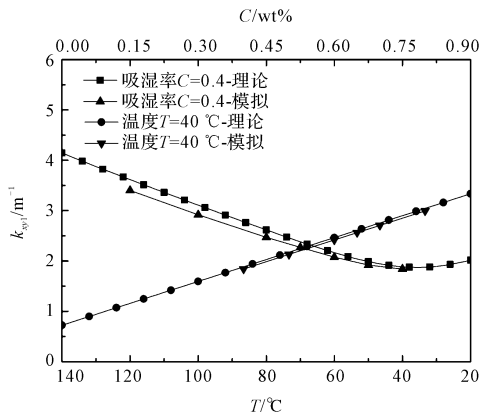


图 6 第一稳态扭曲率 k_{xy1} 的温湿调控

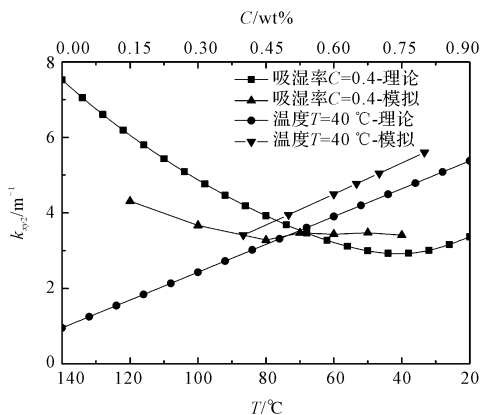


图 7 第二稳态扭曲率 k_{xy2} 的温湿调控

在图 6 中,有限元模型和理论分析都是先保持其中一条曲线的吸湿率 C 为 0.4,其第一稳态扭曲率 k_{xy1} 随着温度的降低不断减小。另一条曲线温度 T 为 40 °C,其第一稳态扭曲率 k_{xy1} 随着吸湿率的增加不断增加。

对比图 6 与图 7 中的曲线可知,改变相同的温度 T 和吸湿率 C 对第二稳态扭曲率 k_{xy2} 调节的幅度相比对第一稳态扭曲率 k_{xy1} 调节的幅度更大。图 6 和图 7 中的理论和有限元模拟结果相比,第一稳态扭曲率 k_{xy1} 的对比误差较小,而对于第二稳态扭曲率 k_{xy2} ,两者在趋势上相符,但在数值上存在一定偏差。

4 结束语

本研究通过理论分析和有限元模拟结合的方式研究温度和湿度对于反对称铺设圆柱壳结构双稳态特性的影响。材料属性上选择随温度相关和不随湿度相关的材料属性进行研究。结合经典层合板理论和考虑温度和湿度影响的层合板刚度关系,推导出反对称铺设圆柱壳结构在温湿环境下的理论模型。同时,建立温湿环境下的反对称铺设圆柱壳结构的有限元模型进行对比研究。

研究表明:(1)反对称铺设圆柱壳结构两个稳态的扭曲率随着温度或吸湿率的增加都不断增加,第二稳态的主曲率随着温度的增加不断增加,而随吸湿率的变化影响较小,对于理论和模拟的对比结果,两者在第一稳态扭曲率上对比误差较小,而在第二稳态主曲率和扭曲率的结果上趋势一致,但存在一定的偏差;(2)有限元软件 ABAQUS 模拟了温湿环境下反对称铺设圆柱壳结构通过机械载荷驱动的 Snap-through 过程的稳态转变过程,在进行单因素变量原则下,得到稳态转变载荷随温度的增加不断减小,而受吸湿率的影响较小;(3)理论和模拟上提出了一种降低温度和增加吸湿率来进行对反对称铺设圆柱壳结构第一稳态和第二稳态扭曲率调控的方法,理论和模拟得到的结果在第一稳态扭曲率 k_{xy1} 的调控上对比误差较小,而对于第二稳态扭曲率 k_{xy2} 的调控上,两者趋势上相符而在数值上存在一定偏差。

(下转第 1292 页)

本文引用格式:

潘 豪,柴国钟,张 征,等. 温湿环境反对称铺设圆柱壳结构的双稳态模型与变形调控研究[J]. 机电工程,2017,34(11):1235-1242,1292.

PAN Hao, CHAI Guo-zhong, ZHANG Zheng, et al. Hygrothermal effect on bistable model of anti-symmetric cylindrical shells and deformation control[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017,34(11):1235-1242,1292.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>