曲面夹层结构成形压力和反弹分析

关世伟

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院，北京 100191)

摘　　要：针对曲面夹层结构制造过程中的力学问题，分析了制造过程中曲面夹层结构的刚度变化，说明了曲面夹层结构的成形机理并给出了刚度计算公式. 讨论了曲面夹层结构成形压力的计算方法，使用板壳理论推导出了小曲率曲面夹层结构的成形压力计算公式，给出了算例和计算结果. 讨论了曲面夹层结构反弹的计算方法，给出了小曲率曲面夹层结构的反弹计算公式和算例的计算结果. 分析了普通蜂窝、柔性蜂窝和微型桁架的变形特点，提出了曲面夹层结构夹芯的选择原则.

关　键　词：夹层板；蜂窝夹层结构；成形；反弹

中图分类号：V 214.6

文献标识码：A　　**文 章 编 号**：1001-5965(2009)02-0151-03

Forming press and spring-back analysis of curving sandwich structure

Guan Shiwei

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

Abstract: Aiming at the mechanics problem during the manufacture process of curving sandwich structure, the changes of the bending stiffness were analyzed, the forming theories were explained and the calculation formulas of bending stiffness were found. By discussing the calculation method of the forming pressure about the microcurving rate curving sandwich structure and using the plate theory, the calculation formulas of the forming pressure about the microcurving rate curving sandwich structures, including the examples and the results were deduced. After discussing the calculation methods of the spring-back about the curving sandwich structures, the calculation formulas of the spring-back about the curving sandwich structures and the results of the calculation examples were presented. Based on the characteristics of the deformation about the common honeycomb, the flexibility honeycomb and the micro-turss structures, the principles of choosing the curving sandwich structures core were also presented.

Key words: sandwich plate; honey comb sandwich structure; form; spring-back

1　问题提出

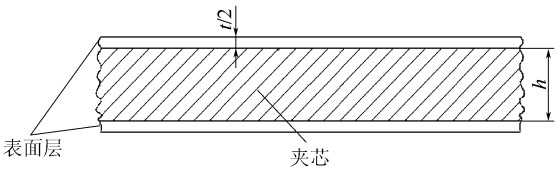
夹层结构通常由 2 个高强度材料的薄壁表面层(承力层)和在表面层之间并与之相连接的小刚度轻质夹芯(发泡塑料、蜂窝、波纹板等)组成(见图 1). 夹层结构具有一系列的优点，其中最重要的就是承力层的稳定性高和结构的弯曲刚度大. 此外，夹层结构具有高质量的外表面、较小的结构重量、良好的隔热性能、能量吸收性能和疲劳性能等. 根据夹层结构的特点，夹层结构适合于制造飞行器的零部件. 特别是曲面夹层结构，可以用来制造火箭的箭体、飞机的机身、雷达罩和舱盖等，还可以用来制造各种反射面，如：太阳能收集装置、射电望远镜、紧缩场和各种其他用途天线的反射面.

关于夹层结构已有大量的研究性文章发表，

收稿日期：2008-07-20

基金项目：航天支撑技术基金资助项目

作者简介：关世伟(1962—)，男，吉林省吉林市人，副教授，guanshiwei@msn.com.



t—夹层结构表面层的总厚度;h—夹芯的厚度.

图1 夹层结构

其中大多数是对固化后的夹层结构进行力学分析和力学性能的研究.对于曲面夹层结构制造中的力学问题研究,在已发表的文章中并不多见.本文主要研究曲面夹层结构的成形压力和反弹.

2 夹层结构的制造过程

夹层结构的成形原理与普通板料成形不同,它与夹层结构的制造过程密切相关.夹层结构的表面层和夹芯之间通常使用胶粘剂进行粘接,在胶粘剂固化时,必须提供必要的压力、温度和时间.对于曲面夹层结构,固化是在具有一定形状的模具上进行的.固化压力除需要满足胶粘剂的固化要求外,还需要满足夹层结构成形所需要的压力.曲面夹层结构的制造过程见图2.对于小曲率夹层结构可以直接使用平面板材进行制造,而对于大曲率夹层结构,表面层则需要预成形,并通过固化压力消除表面层与理论形面的偏差.

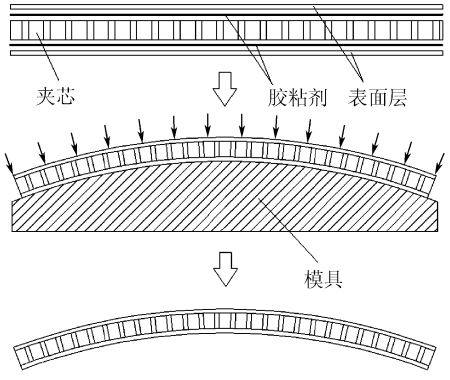


图2 夹层结构的制造过程

3 曲面夹层结构的成形原理

在夹层结构的制造过程中,胶粘剂固化前和固化后夹层结构的弯曲刚度是不同的.在胶粘剂固化前,上下表面层处于自由弯曲状态,如果忽略夹芯的弯曲刚度,夹层结构弯曲刚度只是上下表面层的弯曲刚度之和,对于上下表面层厚度相同的情况下,可以用式(1)[1]表达.式(1)中,E 是弹性模量;t 是表面层总厚度;μ 是泊松比.

$$D_1 = 2 \times \frac{E(t/2)^3}{12(1-\mu^2)} = \frac{Et^3}{48(1-\mu^2)} \qquad (1)$$

在胶粘剂固化后,上下表面层通过夹芯被连接成一个整体,如果忽略夹芯的弯曲刚度,夹层结构弯曲刚度需要用式(2)[2-3]计算.式(2)中,E 是弹性模量;μ 是泊松比;t 是表面层总厚度;h 是表面层间距.

$$D_3 = \frac{Et^3}{12(1-\mu^2)} \times 3\left(\frac{h}{t}\right)^2 \qquad (2)$$

胶粘剂固化后夹层结构的弯曲刚度就是一般意义上的夹层板的弯曲刚度.对于表面层的厚度是2 mm,表面层的间距是20 mm的铝制夹层结构,利用式(1)和式(2)分别计算出胶粘剂固化前后的弯曲刚度.固化前 $D_1 = 13.19\ \mathrm{N \cdot m}$,固化后 $D_3 = 15\,824.18\ \mathrm{N \cdot m}$.可以看到,胶粘剂固化前后,夹层结构的弯曲刚度发生了非常大的变化.胶粘剂固化前夹层结构的弯曲刚度较小,因此,不需要很大的压力就可以使夹层结构产生很大的弯曲变形,从而使夹层结构贴模.而当胶粘剂固化后,夹层结构的弯曲刚度增大,即使去掉压力,夹层结构也能够基本维持原来的形状.当去掉压力之后,夹层结构也会产生反弹,通过改变夹层板的结构参数(表面层的厚度和表面层的间距)可以控制反弹量.在小变形的情况下通常可以将反弹控制在允许范围之内.为了使曲面夹层结构贴模和控制反弹,必须进行固化压力和反弹的计算.

4 固化压力计算

固化压力的计算是一个由已知位移来计算载荷的问题.从理论上来说就是用几何方程计算应变,用物理方程计算内力,再由平衡方程计算出载荷的过程.计算固化压力时需要根据实际情况选择计算方法和计算公式.对于小曲率夹层结构可以使用板理论计算,而对于大曲率夹层结构,由于需要对面板预成形,因此需要使用壳理论计算.对于比较简单的情况(如小曲率柱面),既可以使用理论计算也可以使用数值计算.对于比较复杂的情况(如大曲率球面、抛物面),使用数值计算应该更容易一些.为了简单易懂,以小曲率圆球面为例说明固化压力的计算过程.

夹层结构表面层总厚度 $t = 0.002$ m,弹性模量 $E = 7.2 \times 10^4$ MPa,表面层间距 $h = 0.02$ m.夹层结构理论形面是由曲线 $x^2 + (y+R)^2 = R^2$ 形成的旋转面,且球面半径 $R = 5$ m,口径是 $r_0 = 0.5$ m,参见图3.

根据夹层结构的结构参数,可以认为计算模型满足弹性力学基本假设.由夹层结构的理论形面可以得到夹层结构的极坐标挠度表达式:

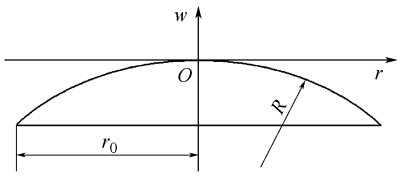


图 3　坐标系

$$w_1(r)=\sqrt{R^2-r^2}-R \tag{3}$$

式中，$w_1(r)$是圆板的挠度；r 是口径. 将式(3)代入在横向载荷作用下圆板对称弯曲的极坐标微分方程[3](式(4))之中，即可以得到载荷的表达式 $q(r)$.

$$\frac{1}{r}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r}\left\{r\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r}\left[\frac{1}{r}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r}\left(r\frac{\mathrm{d}w_1}{\mathrm{d}r}\right)\right]\right\}=\frac{q(r)}{D_1} \tag{4}$$

式(4)中，$q(r)$并不是成形压力，它是成形压力 q_0 与模具反力 $p(r)$的合力，即 $q(r)=p(r)+q_0$. 成形压力通常是抽真空形成的负压，因此，q_0 是常数. 根据贴模条件，有 $p(r)\leqslant 0$. 综合考虑成形压力和模具反力的特点，可知 $q_0=q_{\max}$. 本算例成形压力和模具反力的计算结果见图 4.

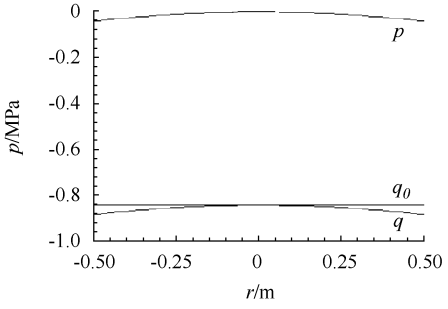


图 4　成形压力和模具反力

5　反弹计算

当粘接固化完成后，上下表面层通过与夹芯连接已经形成了整体曲面夹层结构. 因此，原则上反弹的计算应使用壳体理论. 然而对于三层壳体，即使是形状最简单的圆柱面，计算过程也是比较复杂的. 对于大曲率情况，建议采用数值计算；对于小曲率情况也可以利用板理论来评估. 计算反弹就是计算夹层结构在内力作用下的挠度，根据外载荷与内力的对应关系，反弹的微分方程可以写成下式：

$$\frac{1}{r}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r}\left\{r\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r}\left[\frac{1}{r}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r}\left(r\frac{\mathrm{d}w_3}{\mathrm{d}r}\right)\right]\right\}=-\frac{q(r)}{D_3} \tag{5}$$

将式(3)代入式(4)得到 $q(r)$，再将 $q(r)$代入式(5)即可得到反弹的微分方程的最后表达形式. 解微分方程得到反弹表达式如下：

$$w_3(r)=-\frac{D_1\sqrt{R^2-r^2}}{D_3}+\frac{1}{2}C_3r^2\ln r-\frac{1}{4}C_3r^2+\frac{1}{2}C_1r^2+C_2\ln r+C_4 \tag{6}$$

由于 C_2 和 C_3 是 $\ln r$ 的系数，根据题意 $C_2=0$，$C_3=0$. 代入 $C_2=0$，$C_3=0$ 到式(6)得到只含有 2 个积分常数的反弹表达式：

$$w_3(r)=-\frac{D_1\sqrt{R^2-r^2}}{D_3}+\frac{1}{2}C_1r^2+C_4 \tag{7}$$

利用边界 $w_3(0)=0$ 可以计算出 $C_4=D_1R/D_3$. 式(7)自动满足边界条件 $w_3'(0)=0$，因此不能利用边界条件 $w_3'(0)=0$ 计算出 C_1. 根据题意，当 $D_3=D_1$ 时，$w_3(r)=-w_1(r)$. 分别将式(3)和式(7)代入此式，可以得到 $C_1=0$. 将 $C_1=0$ 和 $C_4=D_1R/D_3$ 代入式(7)，得到反弹的表达式：

$$w_3(r)=-\frac{D_1}{D_3}(\sqrt{R^2-r^2}-R) \tag{8}$$

反弹曲线见图 5.

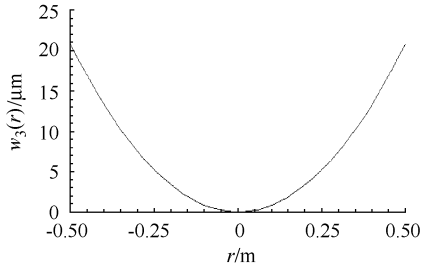
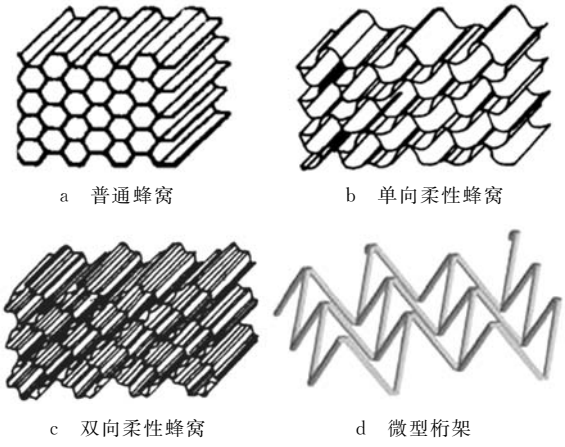


图 5　反弹曲线

6　夹芯选择

尽管计算时通常不考虑夹芯的弯曲刚度，但是对于曲面夹层结构，夹芯的选择仍然是比较重要的. 对于飞行器结构通常使用蜂窝夹芯，然而蜂窝夹芯并不适合制造曲面夹层结构. 主要问题是普通的蜂窝夹芯(如图 6a)不具有弯曲变形的随意性(一个方向向下弯曲的同时在垂直方向向上弯曲形成马鞍面)，因此，无法形成经常使用的曲


a　普通蜂窝　　b　单向柔性蜂窝

c　双向柔性蜂窝　　d　微型桁架

图 6　夹芯

(下转第 187 页)