第 16 卷 第 3 期 复 合 材 料 学 报 Vol 16 No. 3
1999 年 8 月 ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA August 1999

无孔蜂窝夹层结构脱粘剥离应力分析

关世伟
(北京航空航天大学 712 研究室, 北京 100083)

摘 要 将建筑中的弹性地基上板的理论用于蜂窝夹层结构分析, 得出了蜂窝夹层结构面板的变形和夹芯中的应力分布, 建立了有脱粘缺陷蜂窝结构的缺陷容限。

关键词 蜂窝夹层结构, 蜂窝芯, 剥离, 力学
中图分类号 TB331

胶接蜂窝夹层结构是一种特殊的结构用复合材料。它是把蜂窝形状的夹芯材料夹在两块面板之间, 并把它们用胶粘剂互相粘接而成的(如图 1)。由于蜂窝夹芯结构具有良好的比强度和比刚度, 因此使得蜂窝夹层结构被广泛地利用于对重量和性能有特殊要求的航空宇航结构中。近年来, 蜂窝夹层结构在建筑、汽车和电子电气等行业的应用也有了很大的发展。

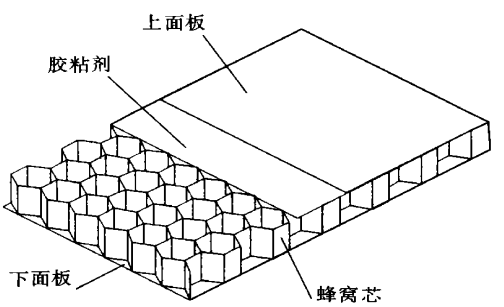

图 1 胶接蜂窝夹芯结构
Fig. 1 Honeycomb sandwich structure

最初的蜂窝结构为了避免夹芯中残留胶粘剂固化时产生的挥发物而制成有孔的蜂窝夹芯, 但是由于孔的存在, 使蜂窝夹芯中容易积水。后来随着胶粘剂的发展, 人们又研制成功无孔蜂窝结构, 现在应用的蜂窝结构绝大部分都是无孔蜂窝。用于无孔蜂窝结构的胶粘剂其主要特点就是固化时挥发物较少, 但无孔蜂窝结构在高温中蜂格内的气压仍是一个值得注意的问题。有人曾做过估算, 飞机在高空、高速($M = 2, h = 20000$ m)飞行时, 飞机表面温度可达 200℃左右, 此时蜂窝夹芯中的压力可以达到 0.015 MPa, 而在蒙皮外表面的压力接近于 0。由于内外压力差的存在就使蜂窝芯受到拉力。如果胶接接头的强度较低, 或者蜂窝芯强度较低, 结构就可能发生破坏。特别是当蜂窝结构存在脱粘缺陷时, 将使缺陷的边缘产生应力集中, 这样就更增加了结构破坏的危险性, 因此我们有必要对有脱粘缺陷的蜂窝夹层结构进行研究。

国内对具有脱粘缺陷的无孔蜂窝夹层结构的承载和破坏已做了大量的试验, 并提出了几种研究脱粘容限的办法, 例如: 90 剥离试验方法, 鼓泡试验方法和高空效应模拟试验方法等。但是这些方法均为研究蜂窝夹层结构脱粘剥离的试验方法, 关于蜂窝夹层结构的脱粘剥离一直缺乏理论分析和合理的估算方法。本文将建筑中的弹性地基上板的理论用于蜂窝夹层结构

收修改稿、初稿日期: 1998-10-15, 1998-07-12

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

分析, 试图通过理论分析为产品设计和质量控制提出论据。

1　理论分析

假设蜂格内的压力 q 均匀分布, 视蜂窝夹芯为弹性基础, 视面板为弹性基础上的板, 缺陷形状为圆形, 半径为 R, 坐标原点在缺陷中心, 参见图 2。

1.1　面板的变形

根据弹性地基上板的理论[1], 弹性地基上圆板的轴对称变形微分方程是

$$\frac{d^2\omega}{d\zeta^2}+\frac{1}{\zeta}\cdot\frac{d\omega}{d\zeta}\pm i\omega=0 \tag{1}$$

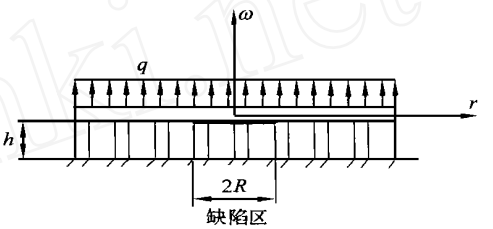

图 2　计算模型

Fig. 2　Calculation model

板的内力可通过下式得到。

$$M=-D\left(\frac{d^2\omega}{dr^2}+\frac{\mu}{r}\cdot\frac{d\omega}{dr}\right) \tag{2}$$

$$Q=-D\frac{d}{dr}\left(\frac{d^2\omega}{dr^2}+\frac{1}{r}\cdot\frac{d\omega}{dr}\right) \tag{3}$$

其中, $\zeta=\frac{r}{l}$, $l=\sqrt[4]{D/k}$。ω是面板的变形,M 是弯矩,Q 是剪力,D 是板的弯曲刚度,k 是地基系数,μ 是柏松比。如果将蜂窝芯视为弹性地基, 那么式(1)也可以作为蜂窝夹层板面板的轴对称变形微分方程。式(1)是贝塞尔方程的两种特殊形式, 利用贝塞尔函数理论[5]可以求解。

$$\omega=A_1J_0(\zeta\sqrt{i})+A_2J_0(\zeta\sqrt{-i})+A_3H_0^{(1)}(\zeta\sqrt{i})+A_4H_0^{(1)}(\zeta\sqrt{-i}) \tag{4}$$

式(4)中, $J_0(\zeta\sqrt{\pm i})$是宗量 $\zeta\sqrt{\pm i}$的零阶第一类贝塞尔函数, $H_0^{(1)}(\zeta\sqrt{\pm i})$是宗量 $\zeta\sqrt{\pm i}$的零阶第三类贝塞尔函数, A_1,A_2,A_3,A_4 是常数。函数 $J_0(\zeta\sqrt{\pm i})$、$H_0^{(1)}(\zeta\sqrt{\pm i})$是复数函数, 但 ω的值应是实数, 因此常数A_1,A_2,A_3,A_4 也应当是复数。为了用实数来表示解, 这里引用下列函数:

$$u_0(\zeta)=R_eJ_0(\zeta\sqrt{i})=\frac{J_0(\zeta\sqrt{i})+J_0(\zeta\sqrt{-i})}{2}$$

$$v_0(\zeta)=J_mJ_0(\zeta\sqrt{i})=\frac{J_0(\zeta\sqrt{i})-J_0(\zeta\sqrt{-i})}{2i}$$

$$f_0(\zeta)=R_eH_0^{(1)}(\zeta\sqrt{i})=\frac{H_0^{(1)}(\zeta\sqrt{i})+H_0^{(1)}(\zeta\sqrt{-i})}{2}$$

$$g_0(\zeta)=J_mH_0^{(1)}(\zeta\sqrt{i})=\frac{H_0^{(1)}(\zeta\sqrt{i})+H_0^{(1)}(\zeta\sqrt{-i})}{2i}$$

将式(4)改写成下式

$$\omega=B_1u_0(\zeta)+B_2v_0(\zeta)+B_3f_0(\zeta)+B_4g_0(\zeta) \tag{5}$$

因为函数 $u_0(\zeta)$、$v_0(\zeta)$、$f_0(\zeta)$、$g_0(\zeta)$是实函数, 所以B_1、B_2、B_3、B_4 也是实数。

由贝塞尔函数理论知, 当 $\zeta\to\infty$时, 函数 $u_0(\zeta)$和 $v_0(\zeta)$变为无限大, 而面板的挠度当 $\zeta\to\infty$时, 应变为零, 因此显然$B_1=0,B_2=0$, 于是式(5)成为

$$\omega=B_3f_0(\zeta)+B_4g_0(\zeta) \tag{6}$$

式(2)和式(3)通过进一步的数学推导可以得到

$$M=-\frac{D}{l^2}[B_3g_0^{(m)}(\zeta)+B_4f_0^{(m)}(\zeta)] \tag{7}$$

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$Q = -\frac{D}{l^3}[B_3 g_0'(\zeta) + B_4 f_0'(\zeta)] \tag{8}$$

式中 $f_0^{(m)}(\zeta) = -f_0(\zeta) - (1-\mu)\frac{g_0'(\zeta)}{\zeta}$, $g_0^{(m)}(\zeta) = g_0(\zeta) - (1-\mu)\frac{f_0'(\zeta)}{\zeta}$。

利用边界条件 $M_R = -\frac{qR^2}{8}$, $Q_R = -\frac{qR}{2}$, 由式(7)、(8)可以计算出 B_3 和 B_4。

$$B_3 = -\frac{l^2}{D}\frac{M_R f_0'(\zeta_R) + Q_R l f_0^{(m)}(\zeta_R)}{f_0'(\zeta_R) g_0^{(m)}(\zeta_R) + g_0'(\zeta_R) f_0^{(m)}(\zeta_R)}$$

$$B_3 = -\frac{l^2}{D}\frac{M_R g_0'(\zeta_R) - Q_R l g_0^{(m)}(\zeta_R)}{f_0'(\zeta_R) g_0^{(m)}(\zeta_R) + g_0'(\zeta_R) f_0^{(m)}(\zeta_R)}$$

M_R 和 Q_R 的值是将缺陷区域内的面板视为具有固定边界的圆板计算而来。

1.2 蜂窝芯中的应力分布

蜂窝夹层结构芯子中的应力 σ 由两部分构成, 一部分是缺陷范围内蜂格中的压力引起的 σ_1; 另一部分是缺陷范围外蜂格中的压力引起的 σ_2。根据变形协调条件, 面板的变形即是芯子的变形, 根据弹性地基理论

$$\sigma_1 = k\omega = \frac{E_x}{h}\omega$$

式中 E_x 是芯子模量, h 是芯子高度, E_x 可通过试验获得。由于 q 均匀分布, 所以很容易计算出 σ_2。

$$\sigma_2 = \frac{E_c}{E_x}q \quad , \quad \sigma = \sigma_1 + \sigma_2 = \frac{E_x}{h}\omega + \frac{E_c}{E_x}q \tag{9}$$

式中, E_c 是芯子材料模量。

1.3 面板的脱粘容限

脱粘容限指的是脱粘缺陷尺寸的最大限度, 圆形缺陷的脱粘容限即缺陷最大容许半径 $[R]$。当芯子中的最大应力等于芯子的许用应力时, 缺陷半径就是脱粘容限。将式(6)代入式(9)可以得到 σ 的分布与 r 的关系。由于芯子中的最大应力发生在缺陷边缘处($r = R$), 因此将 $r = R$ 代入式(6)后再代入式(9)就可以得到最大应力与 R 的确定关系, 令最大应力等于芯子的许用应力, 就可以计算出 $[R]$。由于数学公式的复杂性, 我们无法用显式表示 $[R]$, 为了计算 $[R]$, 可以采用试算法。先指定一个缺陷半径来计算芯子中最大应力, 然后与芯子的许用应力比较, 如果等于芯子的许用应力, 那么指定的半径就是脱粘容限; 如果大于芯子的许用应力, 再重新指定一个小一点的缺陷半径来计算芯子中最大应力, 并与芯子的许用应力比较, 根据比较结果确定是否需要继续计算; 如果小于芯子的许用应力时, 需要再重新指定一个大一点的缺陷半径来计算芯子中最大应力, 并与芯子的许用应力比较, 根据比较结果确定是否需要继续计算。最后总可以计算出脱粘容限。

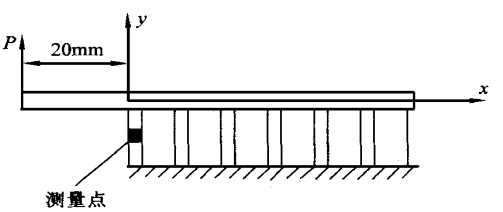

图 3 蜂窝夹层梁的面板剥离

Fig. 3 Face peeling of honeycomb sandwich beam

2 实例与分析

实例 1. 为了验证将建筑中的弹性地基上板的理论用于蜂窝夹层结构分析的正确性, 作者对弹性地基上梁的理论用于蜂窝夹层结构分析做了理论计算和试验结果比较, 计算模型和试验方案见图 3, 面板材料 Ly12cz, 面板厚度 1.2mm, 芯子材料 LF2y, 芯子规格 3×0.04, 芯

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

子高度 16 mm, 胶粘剂为自立-4 胶膜, P = 4.15 kgf, 测量用应变片, 试件数量 5。根据弹性地基上梁的理论[1]得蜂窝夹层梁面板的变形

$$y = \frac{e^{-\beta x}}{2\beta^3 EI}[P\cos\beta x + \beta M(\cos\beta x - \sin\beta x)]$$

式中 $\beta = \sqrt[4]{k/4EI}$, EI 是面板弯曲刚度, P 是剪力, M 是弯矩, k 是地基系数。理论计算和试验结果对比见表 1。

表 1　蜂窝夹层梁面板变形的理论计算和试验结果对比

Table 1　Results of experiment and analytical calculation　　单位: $\mu\epsilon$

实验及计算值	测量点			
	1(x = 3.3mm)	2(x = 1.1mm)	3(x = 0.3mm)	4(x = 2.9mm)
ϵ_t(测量统计值)	157	260	300	172
ϵ (计算值)	174	315	315	174
$\frac{\epsilon-\epsilon_t}{\epsilon_t}\times\%$	10.8%	21.2%	5.0%	1.2%

弹性地基上板和梁的理论在建筑中均是成熟理论, 因此将弹性地基上板和梁的理论用于蜂窝夹层结构分析的关键是如何确定地基系数。地基系数的含义是面板单位变形的反力, 由于面板的变形即是芯子的变形, 因此本文中的地基系数为 $k = E_x/h$。从表 1 可以看出理论计算结果与试验结果两者的偏差较小, 这样也就证明了 $k = E_x/h$ 的正确性。由于将弹性地基上板的理论用于蜂窝夹层结构分析和将弹性地基上梁的理论用于蜂窝夹层结构分析两者使用相同的地基系数 k, 因此梁的试验结果也可以说明板的理论的正确性。

实例 2　面板材料 Ly12cz, 面板厚度 0.3 mm, 芯子材料 LF2y, 芯子规格 3×0.04, 芯子高度 40 mm, 胶粘剂用自立-4 胶膜, q = 0.014 kgf/mm^2。通过计算得到脱粘容限[R] = 42 mm。HB 5368-87 中规定相同结构的蜂窝夹层板的脱粘容限[R] = 20 mm。HB 5368-87 是根据高空效应模拟试验制定的, 由于高空效应模拟试验是在高温中对试件施加循环载荷, 而本文中计算的是在室温中施加静载荷, 虽然不能进行定量比较, 但是可以做些定性分析。高温中材料的强度比室温低, 因此高温中的脱粘容限比室温小。一般来讲, 循环载荷作用下的脱粘容限也应比静载荷作用下的要小。再有本文计算出的[R]值没有考虑安全系数, 所以应比许用脱粘容限要大。以上分析说明了本文计算的脱粘容限要比 HB 5368-87 中规定的脱粘容限大的原因。

3　结　论

本文基于弹性地基上板的理论得出了蜂窝夹层结构面板的变形和夹芯中的应力分布, 建立了有脱粘缺陷蜂窝结构的缺陷容限分析方法, 并通过实验对本文的理论分析进行了验证。实验结果表明本文的理论分析基本上是正确的。

本文中提出的有脱粘缺陷蜂窝结构的缺陷容限分析方法是一种试算法, 它是建立在本文的理论分析基础上的。利用计算机采用这种试算法计算缺陷容限要比采用数值分析方法容易得多。

参　考　文　献

1　张行健译　弹性地基　北京: 建筑工程出版社, 1959

2　郭忠信, 胡凌云　铝合金结构胶接　北京: 国防工业出版社, 1993

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3 陈根座 胶接设计与胶粘剂 北京: 电子工业出版社, 1994
4 张福范 弹性薄板 北京: 科学出版社, 1984
5 SpiegelM R 著, 谢国瑞译 高等数学的理论和习题 上海: 上海科学技术出版社, 1978
6 杨玉昆 合成胶粘剂 北京: 科学出版社, 1983

PEEL ING ANALY SIS OF UNPERFORATED HONEYCOM B STRUCTURE

Guan Shiwei
(Beijing U niversity of A eronautics and A stronautics, Beijing 100083)

Abstract Applying the theory of plate and beam on elastic foundation to analyzing honeycomb structure, this paper gives transformation of the plate and the stress distribution in the honeycomb core, and establishes the defect tolerance of honeycomb structure

Key words honeycomb sandwich structure, honeycomb core, peeling, applied mechanics

(上接第 109 页)

① 不仅限于热塑性树脂, 也可能适用于热固性树脂; ② 不使用溶剂;
③ 与以往热固性树脂预浸料制造方法的成本相当;
④ 热塑性树脂的丝束预浸料可在室温下保存;

⑤ 有柔软性, 成型操作容易。可能制成织物和预形体;

可以期待使用粉包覆丝束预浸料的成型技术有如图 6 所示的发展[10]。

由此看来, 与DC 技术相关的研究正在积极进行, 但达到实用化似乎还要花若干时间。

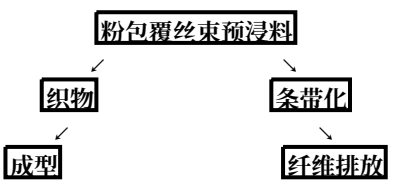

图 6 用粉包覆丝束预浸料的成型技术

1. 2 其他成型技术

Du Pont 公司的 TEPEX (Thermoplastic Engineered Preforms) (图 7)[13]是一种追求低成本化的想法, 由原材料厂家供给便宜的订购铺层板, 由机体厂家负责成型, 是一种钣金结构制造方式。与钣金的情况一样, 配合部件的形状, 可以采用各种成型方法。由于这种订购的铺层板以连续成型的方法制造, 所以非常便宜。玻纤/通用树脂的价格水平为 $15/lb。原材料(纤维和树脂)的种类和形态都可以选择。像飞机部件那样形状复杂和要求强度、刚度时, 准备了 LDF (Long Discontinuous Fiber) 系统[14, 15] (图 8)。LDF 是使用不连续纤维的铺层板, 以不降低强度、刚度而改善成型性。使用LDF, 可以进行型材的弯曲成型及板材的压制成型(图 9, 10)。

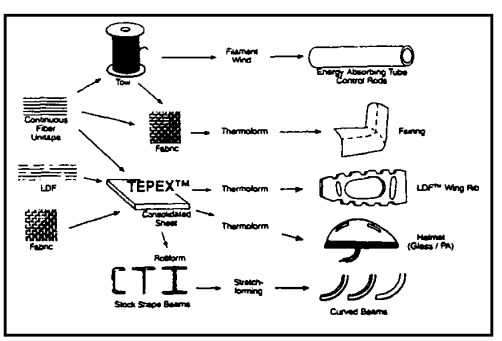

图 7 TEPEX 系统[13]

(下转第 117 页)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net