

文章编号:1671-6833(2013)03-0063-05

高温载荷作用下金属蜂窝夹芯板结构的相变分析

纪占玲^{1,2}

(1. 华北水利水电学院 机械学院, 河南 郑州 450011; 2. 北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191)

摘要:以含相变的多层板热传递理论为依据,采用有限单元法对金属蜂窝夹芯板进行了热分析,研究其在高温载荷作用下的相变问题.计算结果表明,蜂窝夹芯板具有良好的隔热性能,内外表面间最大温差超过450℃;蜂窝芯温度场分布与其余四层不完全相同;各层板受内部设备的影响不同;外蒙皮在加载18s后开始产生固液相变,外胶层11s后开始产生固液相变,到14s时已产生大面积气液相变,损伤面积和损伤程度不断增加.有限单元法较好地模拟了复杂结构在高温载荷作用下的温度场分布、相变失效过程及其演化规律.

关键词:蜂窝芯;高温性能;有限元分析;热分析;相变分析

中图分类号: TB333;TK123 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2013.03.016

0 引言

金属蜂窝夹芯板作为一种新型的多孔复合材料,已在空间运动体构件上广泛采用.由于在服役过程中有时可能会受到较大的高能热载荷的作用,蜂窝芯与内外蒙皮之间胶接结构会因外铝蒙皮的阻热性能差和胶粘剂的熔点和气化点较低等因素影响而导致外蒙皮、胶接层产生相变,对蜂窝夹芯板的机械性能造成严重的影响.在相变过程中,相变界面随着潜热的移动使得相变问题成为强非线性问题.材料的物性参数在相变过程中还会发生较大变化,多维相变问题的求解变得更加困难.

目前,针对蜂窝夹芯板学特性^[1]、传热性能^[2]、冲击吸能^[3]、热弹性变形^[4]、隔热性能^[5]、优化设计^[6]等已有大量文献进行了研究.在相变方面,Hasse等^[7]研究了含相变材料的蜂窝芯壁板如何实现舒适温度问题. Agyenim等^[8]对相变储能系统的相变问题进行了研究.以上文献都是关于相变材料的相变,迄今为止,蜂窝夹芯板的相变研究文献较少.笔者根据多层板稳态和瞬态热传导理论,采用较精确的预测手段有限元法,对金属蜂窝夹芯板在高温下的相变进行研究.

1 问题描述

研究对象为风-光互补发电装置中的电子设备箱的短时热冲击问题.为了确保箱内电子设备的工作,内装有热控设备,对其进行20℃恒温控制,同时也有发热的电子器件.此外,箱外部可能会遇到空间运动体或周围发光器件短时聚焦产生的高能热载荷,假设强度为 q 的热流垂直作用于外表面,作用时间为20s,如图1所示.设备箱为蜂窝夹芯板构件,主要由内外蒙皮和蜂窝芯构成,均采用铝合金材料,通过胶接法连接.由于胶粘剂的熔点和气化点较低,易发生相变,为考虑高温下胶层的损伤破坏,将两层胶粘剂作为独立的两层板.另外,蜂窝芯数量居多,求解困难,在此采用等效板来代替,如图2所示.

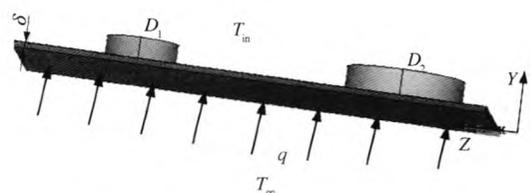


图1 蜂窝夹芯板外载荷作用示意图

Fig. 1 Load diagram of honeycomb sandwich plate

收稿日期:2012-12-12;修订日期:2013-03-01

基金项目:航空科学基金资助项目(2008ZC51028)

作者简介:纪占玲(1979-),女,河南驻马店人,华北水利水电学院讲师,博士研究生,研究方向是现代设计理论与方法,E-mail:lucky7911@sohu.com.

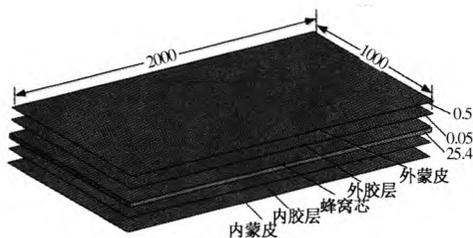


图2 蜂窝夹芯板结构组成

Fig. 2 Composition of honeycomb sandwich panel

2 理论基础

2.1 多层板稳态热传递

加载前,密度为 q_0 的自然环境热流垂直作用在结构板外表面,内部电子元件正常工作发热功率分别为 Φ_1 、 Φ_2 ,内外表面均向 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 环境进行对流热交换,四周为 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 恒温,初始温度为 $20\text{ }^\circ\text{C}$,忽略结构板表面与周围环境间的辐射换热。

稳态热传导控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial x}(k_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(k_z \frac{\partial T}{\partial z}) + \Phi = 0. \quad (1)$$

式中: k_x 、 k_y 、 k_z 分别为3个坐标轴方向的导热系数,除蜂窝芯外,其余4层为各向同性材料,即 $k_x = k_y = k_z$; Φ 为广义热源,主要包括电子元件 D_1 和 D_2 产生的热源。

$y=0$ 表面与外部自然环境的对流换热为

$$\Phi_{c1} = A_{s,0} h_{s,0} (T_{s,0} - T_\infty). \quad (2)$$

式中: $A_{s,0}$ 、 $h_{s,0}$ 、 $T_{s,0}$ 分别为 $y=0$ 表面面积、表面传热系数和表面温度; T_∞ 为环境温度, $T_\infty = 20\text{ }^\circ\text{C}$ 。

$y=\delta$ 表面(除去电子元件覆盖的区域)与内部环境的对流换热为

$$\Phi_{c2} = A_{s,\delta} h_{s,\delta} (T_{s,\delta} - T_{in}). \quad (3)$$

式中: $A_{s,\delta}$ 、 $h_{s,\delta}$ 、 $T_{s,\delta}$ 分别为 $y=\delta$ 表面面积、表面传热系数、表面温度; T_{in} 为构件内部温度, $T_{in} = 20\text{ }^\circ\text{C}$ 。

2.2 多层板瞬态热传递

加载过程中,结构板边界条件除具有加载前的边界条件外,在其外表面再垂直作用密度为 q 的热流,初始条件为加载前稳态温度计算结果,忽略结构板表面与周围环境间的辐射换热。

热传导控制微分方程为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}(k_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(k_z \frac{\partial T}{\partial z}) + \Phi. \quad (4)$$

式中: ρ 为材料密度; c 为材料比热容。

当无相变产生时, Φ 同 2.1。当有相变产生时, Φ 除无相变时的热源外,还包括相变时潜热

的吸收或释放引起的热源 q_3 , 其中, $q_3 = \gamma \frac{dm}{d\tau}$, γ 为潜热, m 为相变部分质量, τ 为时间。对于工程应用材料,相变区域通常为—小的温度区间,设相变开始温度为 T_s , 结束温度为 T_e , 由潜热引起的热源为

$$q_3 = \frac{\gamma}{T_e - T_s} \frac{dT}{d\tau}. \quad (5)$$

$y=0$ 的表面与外部环境的对流换热为

$$-k \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) = q + q_0 - h_{s,0} (T_{s,0} - T_\infty). \quad (6)$$

$y=\delta$ 表面(除去电子元件 D_1 、 D_2 覆盖的区域)与内部环境的对流换热为

$$-k \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) = h_{s,\delta} (T_{s,\delta} - T_{in}). \quad (7)$$

式中: k 为导热系数,其余同上。

3 数值计算和结果分析

采用 solid70 单元对夹芯板结构进行网格划分,共 80 002 节点,98 292 单元,见图 3。当单元边长尺寸缩小 20% 时,计算得到的最高温度相差 0.269%,可以看出,在此基础上加密网格对结果影响较小,因此,网格划分精度能够满足要求。

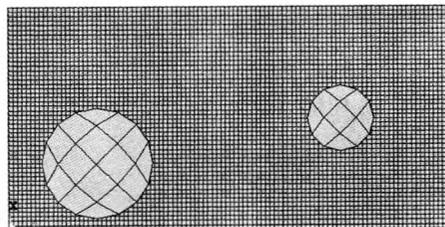


图3 夹芯板结构网格划分

Fig. 3 Mesh to sandwich plate structure

根据求解问题的几何参数、主要载荷参数(见表1)、物理性能参数(见表2)、边界条件和初始条件,结合传热理论,利用 ANSYS 进行计算。

表1 蜂窝夹芯结构主要载荷

Tab. 1 Main loads of honeycomb sandwich structure

载荷类型	符号	数值
外热流密度	q	12 W/cm^2
自然环境热流密度	q_0	$1\ 388\text{ W/m}^2$
热控设备 D1 发热功率	Φ_1	100 W
热控设备 D2 发热功率	Φ_2	80 W
半球反射率	ε	0.8
太阳吸收率	α	0.8

3.1 数值分析方法有效性验证的简单算例

根据参考文献[8],在尺寸为 $80\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 的 K9 玻璃中心较小区域内,用功率密度为

表2 蜂窝芯导热系数和比热容

Tab.2 Thermal conductivity coefficient and heat capacity of honeycomb core

温度/ ℃	$\lambda_x/(W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	$\lambda_y/(W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	$\lambda_z/(W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	比热容/ $(J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$
25	0.805 4	0.715 9	2.147 7	—
100	0.826 2	0.734 4	2.203 2	963
200	0.847 0	0.752 9	2.258 6	1 005
300	0.847 0	0.752 9	2.258 6	1 047
400	0.867 0	0.771 3	2.314 0	1 089

$5.11 \times 10^{11} W/cm^2$ 的激光辐照 10 ns. K9 玻璃熔点为 $1\ 400\ ^\circ C$, 初始温度为 $20\ ^\circ C$. 在此, 采用文中有限元法对其光束辐照效应进行求解, 辐照 10 ns 后辐照面的温度场局部放大图如图 4 所示, 图中黑色区域表示已融化.

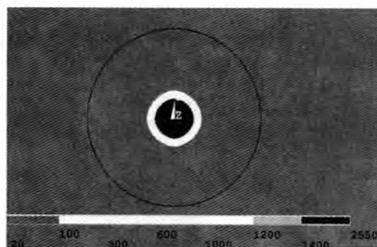


图4 10 ns后辐照面温度场分布局部放大图

Fig.4 Temperature field distribution enlarged locally on the irradiation surface after 10 ns

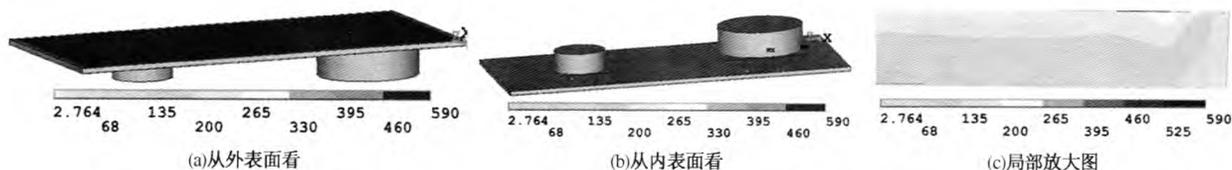


图5 从不同角度查看加载 20 s 时蜂窝夹芯板温度场分布

Fig.5 Temperature field distribution of the honeycomb sandwich plate loaded 20 s from different perspectives

其余大部分区域温度均较高. 但是由于内部设备影响, 内蒙皮和内胶层在内部设备对应处和四周温度较低, 由于铝合金导热性能较好, 内蒙皮与外胶层、内蒙皮与内胶层温差较小; 相反, 胶层与蜂窝芯温差较大.

3.3 内蒙皮和外胶层相变分析

由图 6 可知, 内蒙皮直接受较大载荷的作用, 温度较高, 最高约 $590\ ^\circ C$, 而铝合金熔点为 $570\ ^\circ C$, 表明部分区域已产生了固液相变. 外侧胶层温度也较高, 大部分区域温度超过了 $500\ ^\circ C$, 且胶的熔点和气化点都较低, 表明大部分区域已产生了固液相变, 甚至气液相变. 图 7 为内蒙皮在加载不同时间下的温度场分布及相变情况. 根据相变温度, 在温度场分布图中设置黑色部分表示熔化区域.

由图 7 可以看出, 加载时间虽然不同, 但是外

蒙皮具有基本一致的温度分布规律: 与设备对应处温度的高度, 四周温度较低; 随着载荷作用时间的增加, 温度迅速上升, 在 18 s 前无相变现象产生, 到 19 s 时与内部设备对应处已大面积熔化, 20 s 时熔化面积进一步增大, 且四周也开始熔化.

3.2 加载 20 s 时蜂窝夹芯板各层温度场分布

由图 4 可以看出, 激光辐照 10 ns 后, 在辐照面较小区域内已有固液相变损伤产生, 其周围温度以圆环状依次降低, 而辐照反面还没有开始熔化, 表明在玻璃中心没有完全熔化, 这些现象和温度场分布规律与参考文献[8]经第一个激光脉冲辐照后的实验结果一致, 证明了采用方法的可行性和有效性.

图 5 分别为加载 20 s 时从不同角度查看蜂窝夹芯板的温度场分布. 从图 5(a)、图 5(b) 可看出, 蜂窝夹芯板外表面除四周外温度均较高, 最高温度接近 $590\ ^\circ C$, 位于内部一设备对应处, 内表面温度较低, 不到 $135\ ^\circ C$, 由此可知, 内外表面温差较大, 同时也证明了蜂窝夹芯板具有较好的隔热性能. 在剖面图 5(c) 中, 沿厚度方向有一定的温度梯度, 其余两个方向温度梯度较小; 接近边界处, 呈现温度相对较高的倒置三角形, 表明这些区域沿厚度方向传递热量较快, 其原因主要在于边界处胶层温度较低, 导热性能较好, 向厚度方向传递热量较多; 由于 $20\ ^\circ C$ 恒温边界条件和散热条件较好, 在边界处有温度相对较低的梯形.

加载 20 s 时蜂窝夹芯板各层的温度场分布见图 6. 可以看出, 内蒙皮和外胶层四周温度较低,

图 9 为内蒙皮上典型位置的温度时间历程曲线. 可以看出, 不同位置的温度随加载时间的增加基本保持上升趋势, 但是, 由于相变潜热的存在, 相变点附近温度出现了短时基本不变的现象.

图 8 为外胶层在加载不同时间的温度场分布及相变情况. 图中黑色部分表示熔化区域, 深灰色部分表示气化区域. 在图 8 中, 外胶层温度场分布规律和内蒙皮略有不同, 主要区别在于与设备对应处温度相对较低; 在前 11 s 无相变现象产生, 到 12 s 时除板四周和内部设备对应处外, 已大面

积熔化,14 s时大面积气化,到20 s时,除四周外已基本全部气化.

图10为外胶层上典型位置的温度时间历程曲线.可以看出,不同位置的温度随加载时间的

变化规律不完全相同,有些位置温度上升速度较快,有些位置温度上升速度稍慢,有些还出现了波动.同样,由于相变潜热的存在,在相变点附近温度出现了短时间内基本保持不变的现象.

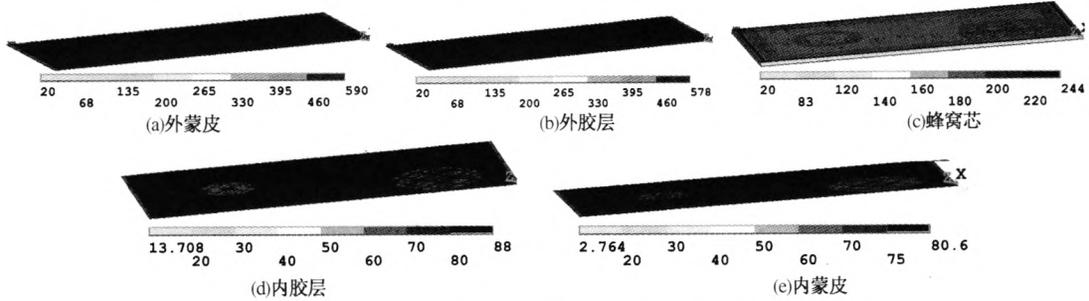


图6 加载20 s时蜂窝夹芯板各层温度场分布

Fig. 6 Temperature field distribution of every layer of the honeycomb sandwich plate loaded 20 s

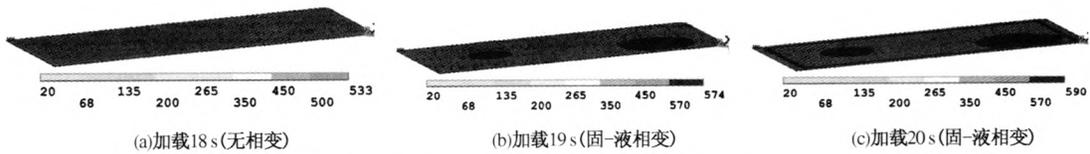


图7 外蒙皮加载不同时间时温度场分布

Fig. 7 Temperature field distribution of the outer skin loaded different time

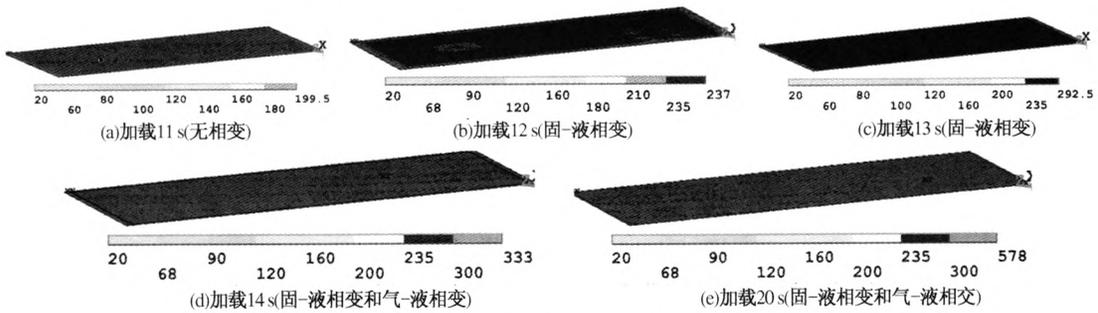


图8 外胶层加载不同时间时温度场分布/°C

Fig. 8 Temperature field distribution of the outer glue loaded different time

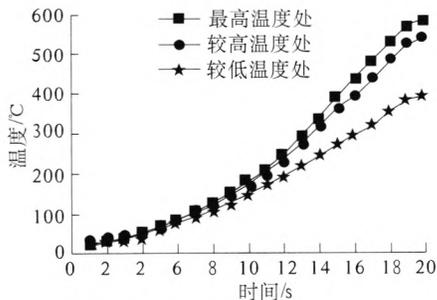


图9 外蒙皮温度时间历程曲线

Fig. 9 Temperature-time curves of the outer skin

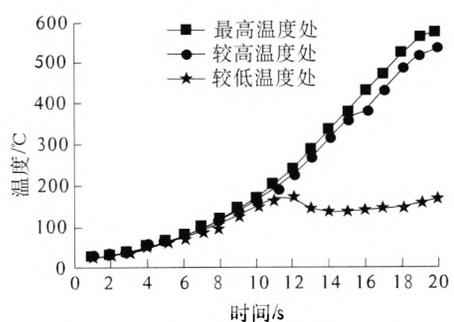


图10 外胶层温度时间历程曲线

Fig. 10 Temperature-time curves of the outer glue

4 结论

在热传导理论上,采用有限元法对蜂窝

夹芯板进行了加载过程中的热分析,尤其对产生相变的外蒙皮和外胶层的温度场进行了动态分析,得到以下主要结论:

(1) 蜂窝夹芯板外表面温度较高,内表面温度较低,证明了蜂窝夹芯板的隔热性能,内外表面间最大温差在 450 °C 以上;

(2) 夹芯板各层温度场分布规律不完全相同,相邻的蒙皮与胶层温差较小,胶层与蜂窝芯温差较大,不同层受内部设备的影响不同;

(3) 外蒙皮 18 s 后开始产生固液相变,外胶层 11 s 后开始产生固液相变,到 14 s 时已大面积气液相变,随着加载时间的增加,损伤面积和损伤程度不断增加。

参考文献:

- [1] FROSTIG Y, THOMSEN O T. Non-linear thermal response of sandwich panels with a flexible core and temperature dependent mechanical properties [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2011, 48 (14/15): 2218 - 2237.
- [2] FAN Xinyu, LI Yubin, LI Juan, et al. Modeling of heat conduction in thermoplastic honeycomb core/face sheet fusion bonding [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2009, 22(4): 685 - 690.
- [3] FELI S, Namdari Pour M H. An analytical model for composite sandwich panels with honeycomb core subjected to high-velocity impact [J]. *Composites: Part B*, 2012, 43(5): 2439 - 2447.
- [4] CRUMP D A, DULIEU-BARTON J M. Assessment of non-adiabatic behaviour in thermoelastic stress analysis of composite sandwich panels [J]. *Experimental Mechanics*, 2012, 52 (2): 829 - 842.
- [5] 吴大方,郑力铭,潘兵,等.非线性热环境下高温合金蜂窝板隔热性能研究[J].*力学学报*,2012,44(2):297 - 307.
- [6] 张秋慧,冯国英,韩敬华,等.多脉冲激光对 K9 玻璃的表面损伤实验研究[J].*强激光与粒子束*,2006,38(1):62 - 65.
- [7] HASSE C, GRENET M, BONTEMPSC André, et al. Realization, test and modeling of honeycomb wallboards containing a phase change material [J]. *Energy and Buildings*, 2011, 43(1): 232 - 238.
- [8] AGYENIM F, HEWITT N, EAMES P, et al. A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS) [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010,14(2): 615 - 628.

Phase Change Analysis for Metal Honeycomb Sandwich Plate Structure Under High Temperature Load

Ji Zhan-ling^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China; 2. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Based on heat transfer theory with phase change of multilayer board, thermal analysis was implemented for metal honeycomb sandwich plate with finite element method (FEM). The research of phase change problem under high temperature load was carried out. The computing results show that honeycomb sandwich plate has good heat insulation performance, the maximum temperature difference was more than 450 °C between the inside and outside surface; temperature field distribution in the honeycomb core layer is not completely identical to the other four layers; it is different that each layer is influenced by the internal devices; the outer skin begins to form the solid-liquid phase change after loaded 18s, the outer glue starts to produce solid-liquid phase change after loaded 11s, and has already large area of gas-liquid phase transition to 14s, damage area and damage degree are increased continuously. It has been better simulated with FEM that temperature field distribution laws, phase transition failure process and its evolution of the complex structures under high temperature load.

Key words: honeycomb; high-temperature property; finite element method (FEM); thermal analysis; phase change analysis