

热载荷蜂窝夹层板作用下固有频率预测与分析

黄帆^{1,2}, 陈昌亚^{1,2}

(1. 上海卫星工程研究所, 上海 200240; 2. 上海市深空探测技术重点实验室, 上海 200240)

摘要: 针对热载荷作用下蜂窝夹层板固有频率变化的问题, 分析了蜂窝夹层板在热载荷作用下的应力分布及固有频率, 并根据应力分布预测了夹层板的固有频率变化, 与仿真得到的频率变化一致。仿真结果表明: 碳纤维蒙皮蜂窝夹层板在热载荷作用下的固有频率基本不变, 且约束形式对频率变化的影响很小; 铝合金蒙皮蜂窝夹层板在热载荷作用下时, 约束形式对频率变化影响很大, 当约束较少时频率基本保持不变, 当约束较多时将引起结构固有频率大幅下降。

关键词: 蜂窝夹层板; 热载荷; 固有频率; 应力分布

中图分类号: V414.6

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2015)04-0371-05

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2015.04.012

0 引言

由于探测器在空间所处的热环境和地面有所不同, 将会在结构中产生热变形及热应力。对于深空探测器, 空间环境更为恶劣, 外热流不断变化, 加之轨道阴影及结构部件遮挡影响, 结构中将产生更为复杂的热应力。热应力将会导致结构弯、扭刚度下降, 结构的固有频率也随之降低, 这有可能引起结构共振^[1], 因此对于深空探测器, 热环境下结构固有频率的分析在设计中更加需要充分重视。由于热应力与结构固有频率密切相关, 热应力的存在将影响结构刚度, 从而影响结构固有频率, 因此可根据结构热应力分布预测结构固有频率的变化情况。

蜂窝夹层结构以其高比强度、高比模量、低密度等优点, 广泛地用于探测器结构设计中^[2]。蜂窝夹层板由上下蒙皮和中间的铝蜂窝芯子组成, 工程中采用碳纤维复合材料或铝合金作为蒙皮, 当采用复合材料作为蒙皮时, 由于铺层顺序、铺层角度的不同, 各单层的热应力计算较为复杂。本文以探测器广泛采用的蜂窝夹层板作为研究对象, 分析两种不同蒙皮形式的夹层板在热载荷作用下的应力分布及固有频率变化情况, 根据热应力分布定性地预测了结构固有频率变化趋势, 并与仿真得到的固有频率变化进行了对比分析。

1 热载荷作用下应力与振动分析

1.1 复合材料热应力计算

对于叠层复合材料结构, 当结构中存在温度变化时, 相当于在结构中附加了“温度内力”和“温度内力矩”, 当材料为对称铺层时, 在仅有温度变化 Δt 的作用下, 各层相应的应力为^[3]

$$\bar{\boldsymbol{\sigma}}_k = (\bar{\boldsymbol{Q}}_k \bar{\boldsymbol{\alpha}}_c - \mathbf{T}_k^{-1} \mathbf{Q} \boldsymbol{\alpha}) \Delta t \quad (1)$$

其中: k 为总铺层数; $\bar{\boldsymbol{\sigma}}_k$ 为各层偏轴方向的应力; $\bar{\boldsymbol{Q}}_k$ 为各层偏轴方向的刚度矩阵; $\bar{\boldsymbol{\alpha}}_c$ 为叠层材料中面内的热膨胀向量; \mathbf{T}_k 为各单层坐标转换矩阵; \mathbf{Q} 为复合材料主轴方向的刚度矩阵; $\boldsymbol{\alpha}$ 为复合材料主轴方向的热膨胀系数向量; Δt 为结构中的温度变化量。

由于在实际强度计算中需要求出单层复合材料中沿材料主轴方向的应力, 可以导出各单层中主轴方向的应力公式为

$$\boldsymbol{\sigma}_k = \mathbf{Q}(\boldsymbol{\alpha}_{c,k} - \boldsymbol{\alpha}) \Delta t \quad (2)$$

其中: $\boldsymbol{\alpha}_{c,k} = \mathbf{T}_k^{-1} \bar{\boldsymbol{\alpha}}_c$, 表示叠层复合材料中面热膨胀系数 $\bar{\boldsymbol{\alpha}}_c$ 在各单层主轴方向上的值, 由于各层的材料主轴方向不同, $\boldsymbol{\alpha}_{c,k}$ 也随不同层而不同。

1.2 热载荷作用下固有频率计算

当结构在热载荷作用下, 由于热应力的存在, 单元需要附加应力刚化项, 结构的刚度阵将由两部分组成: 弹性刚度阵 \mathbf{K}_t 和几何刚度阵 \mathbf{K}_G , 其中几何刚度阵是由热应力引起的, 弹性刚度阵与无热载荷作

用时相同。结构在热载荷作用下的自由振动归结为求解下列广义特征值问题^[4]

$$(\mathbf{K}_l + \mathbf{K}_G - \omega^2 \mathbf{M}) \boldsymbol{\varphi} = 0 \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_l &= \sum_e \mathbf{K}_l^e, \quad \mathbf{K}_G = \sum_e \mathbf{K}_G^e, \quad \mathbf{M} = \sum_e \mathbf{M}^e \\ \mathbf{K}_l^e &= \int_{V_e} \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dV, \quad \mathbf{K}_G^e = \int_{V_e} \mathbf{G}^T \mathbf{S} \mathbf{G} dV, \\ \mathbf{M}^e &= \int_{V_e} \rho \mathbf{N}^T \mathbf{N} dV \end{aligned} \quad (4)$$

式中: \mathbf{N} 为形函数矩阵; \mathbf{G} 中的项是从形函数矩阵 \mathbf{N} 用相应的微分及项的排序得到; \mathbf{S} 为各应力项组成的矩阵。

对于蜂窝夹层板,通常采用板壳单元模拟,则板壳单元的几何刚度阵可表示为

$$\mathbf{K}_G^e = \int_{V_e} \mathbf{G}^T \mathbf{S} \mathbf{G} dV = \int_A \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial x} \\ \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial y} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \sigma_{xT} & \tau_{xyT} \\ \tau_{xyT} & \sigma_{yT} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial x} \\ \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial y} \end{bmatrix} t dA \quad (5)$$

其中: t 为单元厚度,将形函数矩阵代入式(5),然后进行数值积分,就可以得到单元的几何刚度阵。

由几何刚度阵的表达式可以看出,如果结构中负值的应力分量占主要成分,则几何刚度阵对总体刚度阵将起到削弱作用,由式(3)可以看出,这将引起结构特征值的降低,即结构固有频率的降低,因此可通过结构中的应力分布来预测结构固有频率变化情况。

2 计算模型

本文以 $1000 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 的矩形蜂窝板为例,研究结构在温度变化时固有频率变化情况。蜂窝板采用碳纤维复合材料及铝合金两种不同的蒙皮形式,碳纤维蒙皮采用对称铺层,把复合材料铺设为对几何中面($z=0$)为镜面对称,以消除拉弯耦合效应及温度翘曲现象,铺层顺序为 $[0/\pm 45/90]$;单层厚度为 0.1 mm ;总铺层厚度为 0.4 mm ;蜂窝芯子厚度为 29.2 mm ;则蜂窝夹层板的总厚为 30 mm ;材料的 0 度方向为 x 方向。以铝合金作为蒙皮的夹层板中,上下蒙皮均为 0.3 mm ;蜂窝芯子厚度为 29.4 mm ;整个夹层板的总厚度依然为 30 mm 。结构所用的碳纤维复合材料为 M55J/AG60,其性能参数为 $E_{11} = 280 \text{ GPa}$; $E_{22} = 13.8 \text{ GPa}$; $E_{12} = 4.6 \text{ GPa}$;单层材料的热膨胀系数为 $0^\circ \text{方向} - 0.5 \times 10^{-6} / \text{℃}$; $90^\circ \text{方向} 44.9 \times 10^{-6} / \text{℃}$;铝合金的弹性模量为 71 GPa ;热膨胀系数为 $22.7 \times 10^{-6} / \text{℃}$ 。

结构采用两种不同的约束形式,如图 1 及图 2 所示,一种形式为左端固支,右端自由,另一种形式为左右两端均固支。结构中的温度载荷按如下方式加载:初始温度为 20°C ,此时在结构中无热载荷,此后,结构温度从 20°C 变化至 100°C ,每 10°C 为一载荷步,共计 9 个载荷步,分析结构在各温度载荷下的热应力与固有频率,模型的建立与分析是在结构有限元软件 MSC. Patran/Nastran 上进行的。

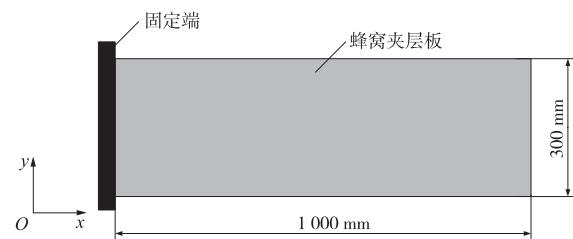


图 1 约束一:单端固支
Fig. 1 Constraint 1: one side fixed

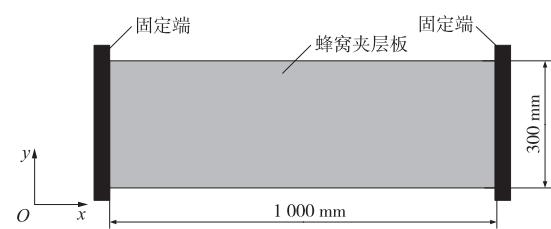


图 2 约束二:双端固支
Fig. 2 Constraint 2: two side fixed

3 计算结果与讨论

3.1 应力分布

1) 碳纤维蒙皮

对于单端固支的碳纤维蒙皮蜂窝夹层板,在结构温度为 100°C 的情况下, 0° 方向铺层与 45° 方向铺层在主轴方向的应力分布如图 3 及图 4 所示, 90° 方向的应力分布与 0° 方向类似, -45° 方向的应力分布与 45° 方向类似。

由图中可见,当靠近约束端时结构应力较大,在自由端时应力较小,同时可以看出,在单层中存在占主导地位的应力,大部分结构的应力相同,可以代表该单层的应力分布。由几何刚度阵的表达式(5)可以看出,通过主轴方向的应力分布到几何刚度阵,因此,可以根据各单层占主导地位的应力来估计几何刚度阵,通过几何刚度阵的变化估计固有频率的变化趋势,表 1 即列出了碳纤维蒙皮各单层在结构温度为 100°C 时主轴方向的主导应力。

然而表 1 并没有给出各单层面内剪应力的分布

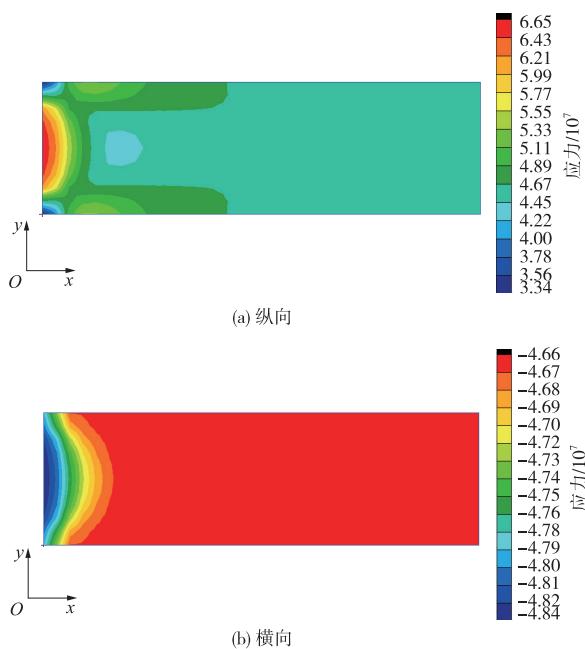


图3 单端固支 0°方向碳纤维蒙皮热应力分布

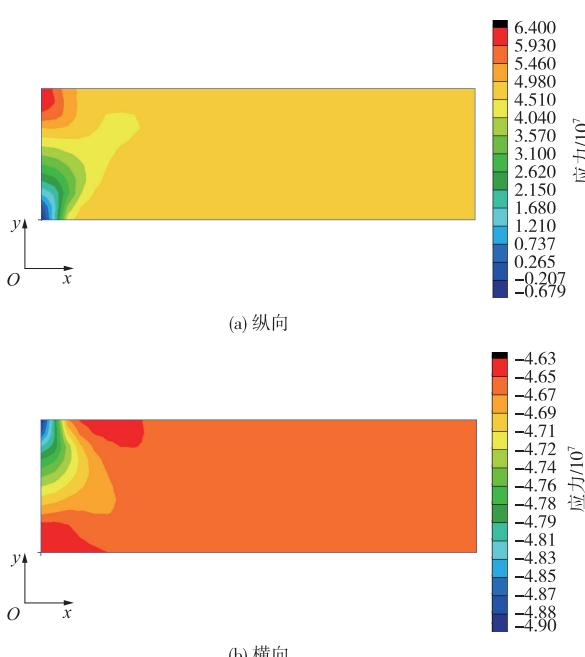
Fig. 3 Stress distribution of 0° direction carbon fiber skin when one side fixed

图4 单端固支 45°方向碳纤维蒙皮热应力分布

Fig. 4 Stress distribution of 45° direction carbon fiber skin when one side fixed

情况,因为分析发现,在结构温度为 100°C 情况下,当单端固支时,各单层占主导地位的剪应力均在 0.1 MPa 以下,当双端固支时, 0° 和 90° 单层大部分结构都不存在剪应力, $\pm 45^\circ$ 单层占主导地位的剪应力分别为 $\pm 1.17 \text{ MPa}$, 相比于纵向及横向应力幅值很小,在分析中可近似忽略不计。

表 1 碳纤维蒙皮各单层主轴方向主导热应力
Table 1 Master thermal stress of principal axis of carbon fiber skin

铺层方向/MPa	单端固支		双端固支	
	纵向	横向	纵向	横向
0	46.7	-46.7	-5.87	-46.5
+45	49.8	-46.7	34.0	-47.8
-45	49.8	-46.7	34.0	-47.8
90	48.1	-46.7	64.2	-49.0

由表 1 可见,由于温度载荷的存在,在复合材料结构的横向产生了较大的热应力,对于复合材料这种纵向性能很好而横向性能很差的结构是较为不利的,如果加上机械载荷等其他载荷作用,或者结构形式与约束条件发生改变,复合材料结构很有可能出现失效的危险,在结构设计中需要充分考虑这一点。

2) 铝合金蒙皮

铝蒙皮为各向同性材料,没有纵向与横向之分,采用有限元方法时,以二维板壳单元模拟蜂窝夹层板结构,为了统一,也可将 x 及 y 方向看作铝蒙皮的纵向及横向,图 5 显示了单端约束铝蒙皮 100°C 时的热应力分布。同样的,当靠近约束端时结构应力较大,在自由端时应力迅速减小,同时结构中依然存在占主导地位的应力,以此可以用来估计几何刚度阵,表 2 列出了在单端及双端固支时结构占主导地位的热应力。

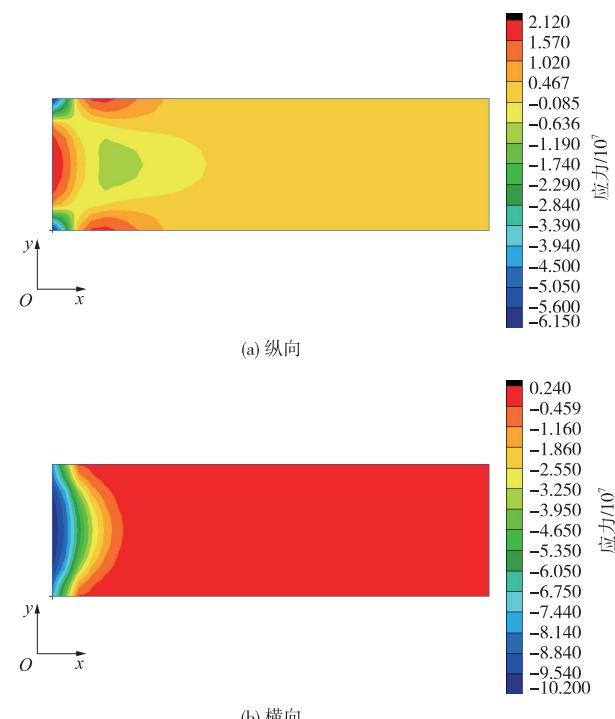
图5 单端固支铝蒙皮 100°C 时热应力分布

Fig. 5 Stress distribution of aluminum alloy skin when one side fixed

3.2 固有频率的定性预测

1) 碳纤维蒙皮蜂窝夹层板

表 1 列出了碳纤维蒙皮各单层在结构温度为 100 °C 时主轴方向的主导热应力, 表中的数据是结构占主导地位的应力, 可以较全面地代表结构的应力分布, 定性分析结构固有频率随温度的变化情况。由表 1 可知, 碳纤维蒙皮在单端固支时各单层主轴方向的应力大小基本相等, 但是符号相反, 因此几何刚度阵应基本为零, 结构的整体刚度阵基本不变。双端固支时横向应力相对纵向应力总体上数值占优, 但是优势并不明显, 且横向应力的数值为负值, 因此几何刚度阵应为负值, 但是数值并不大, 结构的整体刚度阵会有小幅降低。由此可以预测, 碳纤维蒙皮蜂窝夹层板在单端约束时的固有频率基本不变, 而在双端约束时固有频率会有所降低, 但降低的幅度较小。

2) 铝合金蒙皮蜂窝夹层板

表 2 列出了铝蒙皮在结构温度为 100 °C 时主轴方向的主导热应力。由表中可知, 在单端固支时结构中的热应力数值很小, 因此结构的整体刚度阵基本不变; 在双端固支时, 尽管横向应力很小, 但是纵向应力很大, 且数值为负值, 因此结构的整体刚度阵

会有大幅降低。由此可以预测, 铝蒙皮蜂窝夹层板在单端固支时的固有频率基本不变, 而在双端固支时固有频率将有较大幅度的降低。

表 2 铝蒙皮主轴方向主导热应力 / MPa

Table 2 Master thermal stress of principal axis of aluminum alloy skin

MPa

固定方式	纵向	横向
单端固支	-0.845	-4.59
双端固支	-132	-5.97

3.3 固有频率的定量分析

为了更精确地考察结构固有频率随温度载荷的变化情况, 下表列出了结构温度从 20 °C ~ 100 °C 时的一阶固有频率。由表中可知, 单端固支时, 不管是碳纤维蒙皮还是铝蒙皮蜂窝夹层板, 一阶频率随温度变化基本不变; 双端固支时, 碳纤维蒙皮蜂窝夹层板一阶频率随温度有小幅下降, 在结构温度为 100 °C 时, 降低了 3.2 Hz, 降幅为 1.2%, 而铝蒙皮蜂窝夹层板一阶频率随温度变化有大幅下降, 从最初的 187.3 Hz 降低至 164.0 Hz, 降低了 12.4%。结构一阶频率随温度的变化趋势如图 6 与图 7 所示, 可知, 结构固有频率变化趋势与上节中的预测一致, 说明了利用应力分布预测结构固有频率变化的有效性。

表 3 一阶频率随温度变化统计表

Table 3 The change of first order frequency with temperature

约束形式	蒙皮类型 / Hz	结构温度 / °C									
		20	30	40	50	60	70	80	90	100	
单端固支	碳纤维蒙皮	47.05	47.05	47.05	47.05	47.05	47.05	47.05	47.05	47.04	
	铝合金蒙皮	31.88	31.87	31.87	31.86	31.85	31.85	31.84	31.83	31.83	
双端固支	碳纤维蒙皮	258.7	258.3	257.9	257.5	257.1	256.7	256.3	255.9	255.5	
	铝合金蒙皮	187.3	184.6	181.8	179.0	176.1	173.2	170.2	167.1	164.0	

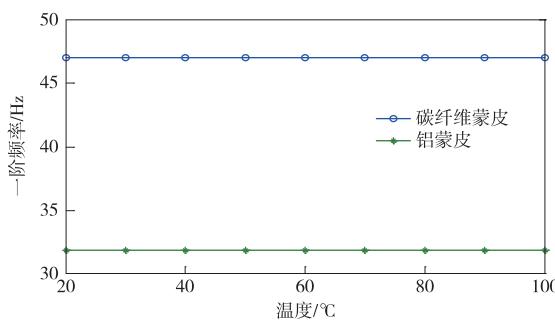


图 6 单端固支时一阶频率随温度变化

Fig. 6 The change of first order frequency with temperature when one side fixed

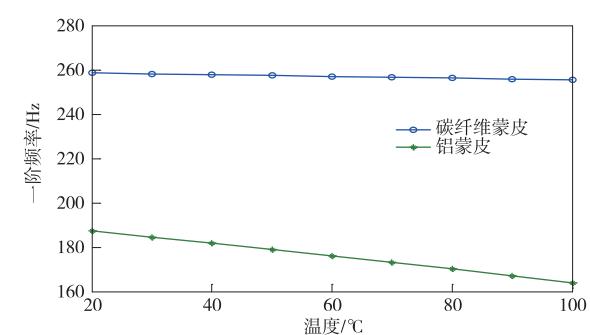


图 7 双端固支时一阶频率随温度变化

Fig. 7 The change of first order frequency with temperature when two side fixed

对于碳纤维蒙皮蜂窝夹层板, 不管是单端固支还是双端固支, 结构的一阶频率都基本不变, 说明温度载荷与约束形式对碳纤维蒙皮蜂窝夹层板的固有频率变化影响很小。这是由于热载荷作用下, 各铺层之间需保持变形协调, 导致各铺层的纵向与横向

应力大小接近, 而数值相反, 从而对几何刚度阵的影响相互抵消, 结构的总体刚度阵基本不变, 结构的固有频率也因而基本不变。

对于铝蒙皮蜂窝夹层板, 结构的约束形式对固有频率的影响很大, 单端固支时一阶频率基本不变,

双端固支时一阶频率大幅降低。这是由于单端固支时,结构的一端是自由的,在热载荷作用下,结构一端可以自由膨胀,在结构中只产生很小的热应力,对刚度阵的影响很小,从而结构的固有频率基本不变。而双端固支时,结构两端都不能自由膨胀,从而在结构中产生了数值较大的压应力,大大减小了总体刚度,导致结构固有频率大幅降低,在本例中达到了12.4%,有可能与其他频率耦合从而引起结构共振,这在温度变化剧烈的结构中是需要着重考虑的。

4 结 论

本文利用有限元软件 MSC. Patran/Nastran 分析了蜂窝夹层板在热载荷作用下的应力分布及固有频率变化情况,根据本文计算结果可以得到如下结论:

1)根据应力分布预测结构固有频率变化是可行的,本文根据蜂窝夹层板应力分布预测了夹层板的频率变化,与仿真得到的频率变化一致,说明了该方法的有效性。

2)碳纤维蒙皮蜂窝夹层板在热载荷作用下的固有频率基本不变,且约束形式对频率变化的影响很小,但是材料的纵向应力较大,在设计中需充分注意。

3)铝合金蒙皮蜂窝夹层板在热载荷作用下时,约束形式对频率变化的影响很大,当约束较少、结构可相对自由膨胀时,频率基本不变;当约束较多、结构不能自由膨胀时,频率将大幅下降,在本文的算例中,当结构整体温升80℃时,一阶频率降低了

12.4%,在温度变化剧烈的结构中需着重考虑以避免引起结构共振。

参 考 文 献

- [1] 史晓鸣,杨炳渊.瞬态加热环境下变厚度板温度场及热模态分析[J].计算机辅助工程,2006(增刊):15-18. [Shi X M, Yang B Y. Temperature field and mode analysis of flatplate with the thermal environment transients[J]. Computer Aided Engineering, 2006(S):15-18.]
- [2] 袁家军,于登云,陈烈民.卫星结构设计与分析[M].北京:中国宇航出版社,2004:157-176. [Yuan J J, Yu D Y, Chen L M. Satellite structural design and analysis[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2004:157-176.]
- [3] 王斌.结构多性能优化设计及其在航天结构设计中的应用[D].大连:大连理工大学,2010. [Wang B. Multi-performance optimization of structure and its application in aerospace structural design[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.]
- [4] 陈烈民,杨宝宁.复合材料的力学分析[M].北京:中国科学技术出版社,2006:157-176. [Chen L M, Yang B N. Mechanical analysis for composite material[M]. Beijing: Science and Technology of China Press, 2006:157-176.]

作者简介:

黄帆(1990—),男,硕士,主要研究方向:航天器结构设计与分析。

通信地址:上海市闵行区华宁路251号上海卫星工程研究所4室(200240)

电话:(021)34054518-6402

E-mail:hf_sise@126.com

Natural Frequency Prediction and Analysis of Honeycomb Sandwich Plate with Thermal Load

HUANG Fan^{1,2}, CHEN Changya^{1,2}

(1. Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 200240, China; 2. Laboratory of Deep Space Exploration, Shanghai 200240, China)

Abstract: The stress distribution and natural frequency changing of honeycomb sandwich plate is proposed in this paper with thermal load, and the natural frequency of honeycomb and sandwich plate is predicted according to the stress distribution. The simulation results show that the natural frequency of honeycomb and sandwich plate with carbon fiber skin is essentially the same with thermal load, and the constraint effect to the frequency change is very small. The frequency of honeycomb and sandwich plate with aluminum alloy skin with thermal load changes greatly when constraint form changes, and the frequency is essentially the same with a small amount of constraint, and the major constraint will cause the frequency decreasing dramatically.

Key words: honeycomb sandwich plate; thermal load; natural frequency; stress distribution

[责任编辑:宋宏]