

文章编号:1006-1355(2017)05-0160-06

## 行波管中高温平板结构动力学响应预报

田艳妮<sup>1</sup>, 王建民<sup>2</sup>, 秦朝红<sup>2</sup>, 程昊<sup>2</sup>, 华宏星<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学 振动、冲击、噪声研究所 机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240;  
2. 北京环境强度研究所 可靠性与环境工程技术重点实验室, 北京 100076)

**摘要:** 研究热噪声复合载荷作用下结构的动力学响应对高超声速飞行器结构的设计具有重要的指导意义, 实验室多采用高温行波管进行热噪声复合试验研究, 本文针对行波管中高温平板结构动力学响应预示方法进行研究。选取四边固支 C/SiC 材料平板为研究对象, 首先研究热效应对平板结构固有模态特性的影响, 然后在平板表面施加一维行波声载荷模拟行波管中声场, 利用解析方法求解结构在热噪声复合载荷下的动力学响应。结果表明, 在加热过程中平板固有频率先减小至极小值, 而后逐渐回升。在固有频率下降阶段, 材料弹性模量减小和热应力对于结构刚度的软化效应强于热变形的硬化效应; 在固有频率回升阶段, 热变形的硬化效用起决定性作用。线性响应范围内, 平板在热噪声复合载荷下的加速度响应特性取决于其热模态。

**关键词:** 振动与波; 行波管; 热模态; 热屈曲; 热噪声复合载荷

**中图分类号:** V414.3<sup>3</sup>

**文献标识码:** A

**DOI 编码:** 10.3969/j.issn.1006-1355.2017.05.033

## Thermal-acoustic Response Prediction of High-temperature Flat Plates in Traveling-wave Tubes

TIAN Yan-ni<sup>1</sup>, WANG Jian-min<sup>2</sup>, QIN Zhao-hong<sup>2</sup>,  
CHENG Hao<sup>2</sup>, HUA Hong-xing<sup>1</sup>

(1. Institute of Vibration, Shock and Noise Research, State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;  
2. Science and Technology on Reliability and Environment Engineering Laboratory, Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076, China)

**Abstract:** Research on the dynamic and acoustic responses of flat plates in thermal environments is significant to the optimal design of hypersonic aircrafts. For laboratory tests, the high-temperature traveling-wave tube is usually employed to simulate the thermal and acoustic environment to investigate the thermal-acoustic responses of high-temperature structures. In this paper, the thermal-acoustic responses of high-temperature plates in traveling-wave tubes are studied. Based on thin-plate theory and finite element method, the influences of high temperature on the inherent characteristics of flat plates are investigated. The dynamic responses of a simply supported heated C/SiC plates under random acoustic excitation are calculated and analyzed. First of all, the influence of thermal effect on the intrinsic modal characteristics of the flat plate is analyzed. Then, the acoustic load of a one-dimensional traveling wave is added on the surface of the plate. Finally, the analytical method is used to solve dynamic response of the plate under the thermal-acoustic combined loading. The results show that in the heating process, the intrinsic frequency of the plate decreases initially to a minimum value and then increases gradually. In the stage of intrinsic frequency decreasing, the softening effect due to elastic modulus reduction and thermal stresses is stronger than the hardening effect due to the thermal deformation. While in the stage of the intrinsic frequency re-increasing, the hardening effect due to the thermal deformation is dominant. In the range of linear response, the acceleration response of the plate to the thermal-acoustic combined loading depends on its thermal modes.

**Key words:** vibration and wave; traveling-wave tube; thermal mode; thermal buckling; a combination of thermal and acoustic environments

收稿日期: 2017-03-30

基金项目: 973 资助项目 (111402028)

作者简介: 田艳妮 (1991—), 女, 山东省威海市人, 硕士研究生, 目前从事热噪声载荷下时变结构动力学响应

分析方法研究。

E-mail: tian\_yan\_ni@163.com

通信作者: 华宏星, 男, 博士生导师。

Email: hhx@sjtu.edu.cn

高超声速飞行器服役时,处于气动载荷、热载荷、噪声载荷和机械载荷的复杂环境中。一方面,由于热对流和热传导作用,热环境和温度场随时间变化,改变结构的材料性能,同时使结构产生热变形,诱发热应力,进而改变结构的固有特性;另一方面,噪声载荷本质上是一种具有一定空间分布和频率分布特征的随机压力载荷,飞行器结构通常采用的复合材料壁板结构对噪声载荷极为敏感,在某些频率上易产生足够大的应力,使得结构发生疲劳失效<sup>[1]</sup>。

近年来,国内外学者分别从热噪声试验<sup>[2]</sup>和响应预示方法<sup>[3]</sup>的建立两个方面对薄壁结构在热噪声复合载荷下的响应和疲劳寿命问题进行了诸多研究。文献[3-5]均利用商用软件及其二次平台进行热噪声复合环境下动响应预示方法的开发,研究对象涉及梁、板和复杂结构,考虑真实服役热噪声复合载荷。沈阳航空航天大学先后对声载荷和恒定或带有温度梯度的热载荷<sup>[6]</sup>复合作用下的各向同性四边简支薄板、加筋板<sup>[7]</sup>、复合材料薄板<sup>[8]</sup>进行响应计算,结果表明,热载荷通过改变结构刚度特性曲线的形状影响响应的非线性特性,噪声载荷使结构工作在刚度曲线的不同区域。吴振强等研究了热环境对固有模态的影响,并对比分析了均匀和非均匀温度场的影响效果<sup>[9]</sup>。贺尔铭等基于时域分析法研究了金属薄壁结构在热噪声复合载荷下的非线性振动响应特性,采用四种应力模型预测了薄壁梁的热噪声疲劳寿命<sup>[10]</sup>。

采用频率域、波数域的特征方法既能更好地揭示随机载荷特征与结构固有特性的相互作用机制,同时相对于时间域、空间域分析方法,也能够减小计算成本,提高计算速度。因此,目前对随机脉动压力作用下加筋板壳结构动力学响应问题的求解,普遍采用在波数-频率域的求解方法<sup>[11-15]</sup>。其中,随机脉动压力采用功率谱密度矩阵的形式输入,加筋板壳结构采用波数或者模态波数进行表征,对波数进行截断,通过波数域积分求得结构的动力学响应。Moosrainer和Neubiberg在Sysnoise中,采用了耦合的有限元/边界元方法,研究了薄壁结构在高强度散射声场中的响应<sup>[16]</sup>,其中声载荷采用PSD矩阵描述,随机响应由输入的PSD矩阵和耦合系统的复频响应函数矩阵获得。

目前,国内外的热噪声试验设备多采用高温行波管装置。针对此现状,本文借助有限元求解方法,研究了热效应对四边固支平板固有模态特性的影响机理,并以此为基础,建立求解行波管中高温薄壁结构的动力学响应的预示方法,并从模态特征、频率变化、幅值变化三个方面对响应结果进行详细分析。

## 1 结构及载荷的有限元建模

### 1.1 考虑热环境影响的各向异性平板动力学建模

综合考虑热效应对平板动力学特性的影响以及热噪声复合载荷的作用,本文采用有限元方法推导出正交各项异性平板的动力学响应控制方程。设常温下有限元方程中的结构刚度矩阵只包含传统刚度矩阵 $\mathbf{K}$ ;高温条件引起的热应力导致附加应力刚度矩阵 $\mathbf{K}_\sigma$ 产生;气动加热条件异常严酷,必须考虑薄板结构的大位移变形因素,由此产生附加的非线性刚度矩阵 $\mathbf{K}_{NL}$ 。忽略阻尼效应的情况下,含预应力并考虑几何非线性变形的动力学响应分析的控制方程表示为<sup>[17]</sup>

$$(\mathbf{K} + \mathbf{K}_\sigma + \mathbf{K}_{NL})\mathbf{U} + \mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} = \mathbf{P} \quad (1)$$

其中 $\mathbf{M}$ 为质量矩阵, $\mathbf{U}$ 为位移向量, $\mathbf{P}$ 在本文中为声载荷激励向量, $\mathbf{K}$ 为传统的刚度矩阵, $\mathbf{K}_\sigma$ 为应力刚度矩阵,表示为

$$\mathbf{K}_\sigma = \sum_i \int_{A_i} \mathbf{G}_T \begin{bmatrix} \mathbf{N}_x & \mathbf{N}_{xy} \\ \mathbf{N}_{yx} & \mathbf{N}_y \end{bmatrix} \mathbf{G} dA \quad (2)$$

其中 $\mathbf{G}$ 为应变-位移矩阵, $\mathbf{N}_x, \mathbf{N}_y, \mathbf{N}_{xy}, \mathbf{N}_{yx}$ 为薄膜力, $A_i$ 为第 $i$ 个单元的面积。 $\mathbf{K}_{NL}$ 为考虑非线性时的结构刚度矩阵,表示为

$$\mathbf{K}_{NL} = \int_{\Omega} \mathbf{B}_L^T \mathbf{D}_T \mathbf{B}_{NL} d\Omega \quad (3)$$

式中 $\mathbf{B}_L$ 为结构变形矩阵的线性部分, $\mathbf{B}_{NL}$ 为非线性部分。

### 1.2 一维行波声场建模

假设行波管中的一维行波声压载荷表达式为

$$P = \sum_{\omega} A \cos(\omega t - kx) \quad (4)$$

其中 $\omega$ 为圆频率, $k = \omega/v$ 为波数, $v$ 为声波传播速度, $A$ 为声压幅值。将行波声压转化为作用在结构网格节点上的集中载荷,则两不同节点 $m$ 与 $n$ 的压力互功率谱密度表示为

$$S_{mn} = \frac{\pi}{2} A^2 f e^{jk(x_m - x_n)} \quad (5)$$

而某一节点声压的自功率谱密度为

$$S_{mm} = \frac{\pi}{2} A^2 f \quad (6)$$

其中 $f = \omega/2\pi$ 为声载荷的频率, $x_m$ 和 $x_n$ 分别为 $m$ 、 $n$ 节点沿平板结构长度方向的坐标值。平板上的一维行波载荷采用功率谱密度矩阵的形式输入。

## 2 热环境对结构模态特性影响分析

### 2.1 数值模型

本文以尺寸为380 mm×260 mm,厚度为1.5 mm的矩形平板为研究对象,边界条件为四周固支,实际

暴露于噪声载荷的面积为  $320\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 。使用 Abaqus 建立有限元模型,采用壳单元模拟平板结构,网格尺寸为  $5\text{ mm}$ ,共计 3 952 个单元。平板采用 C/SiC 材料,密度为  $2\ 100\text{ kg/m}^3$ 。

## 2.2 均匀温度载荷下平板结构热振动模态分析

由式(1)可知,热效应对结构刚度的影响主要体现在三个方面:

(1) 材料的弹性模量随温度改变而发生变化,引起结构刚度特性的变化;

(2) 结构在高温环境或约束状态下,有热应力的产生,并引起刚度特性的改变;

(3) 结构非线性几何变形对刚度的影响。因此,本文借助有限元软件 Abaqus 分别就以上 3 个因素研究热效应对结构固有特性的影响。

只考虑材料特性对结构固有模态影响时,可以得到图 1 所示的固有频率-温度曲线,可见随着温度升高,平板固有频率缓慢降低。这一现象可由表 1 中弹性模量随温度升高而减小解释。其中,第 6、第 7 阶固有频率相差无几,频率曲线几近重合。

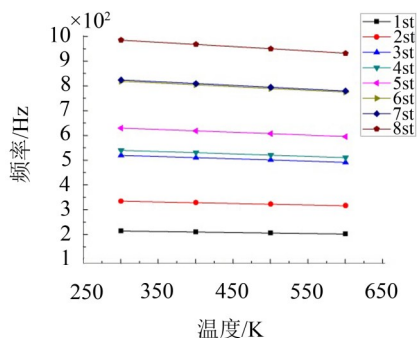


图 1 只考虑材料特性,对结构固有频率

由式(2)可知,结构温度变化导致的热预应力会产生附加刚度。在本文中,先通过静力学分析获得该热预应力,再对高温平板进行含预应力的动力学分析。同时考虑材料特性变化和热预应力对固有频率的影响,可得到图 2 所示的固有频率-温度曲线。

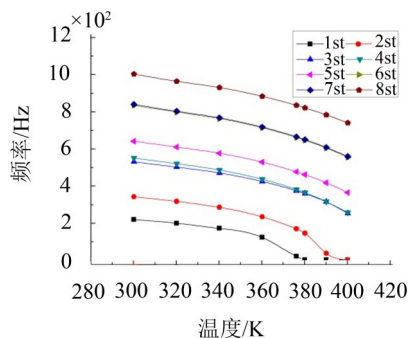


图 2 考虑材料特性和热应力,结构固有频率

对比图 1 可知,热预应力使得平板各阶模态频率随温度增加而减小的速率显著增加,由此可知,结

构受热引发的材料特性变化和热预应力均使结构的固有频率降低。随着温度升高,固有频率自低阶至高阶依次减小至零。第 1 阶固有频率减少到零时的对应温度即为平板的 1 阶临界屈曲温度。

由式(3)可知,几何非线性变形影响结构的刚度特性,进而影响结构固有模态。同时考虑材料特性、热预应力、非线性几何变形对结构固有频率的影响,取  $T_0=300\text{ K}$  作为平板初始温度,首先通过计算获得 1 阶临界屈曲温度  $T_c=376\text{ K}$ ,并定义屈曲系数  $S=(T-T_0)/(T_c-T_0)$ 。根据 1、2 阶屈曲振型和屈曲系数  $S$  模拟平板结构的几何变形,计算得到不同屈曲系数  $S$  下平板的热模态特性,如图 3 所示。

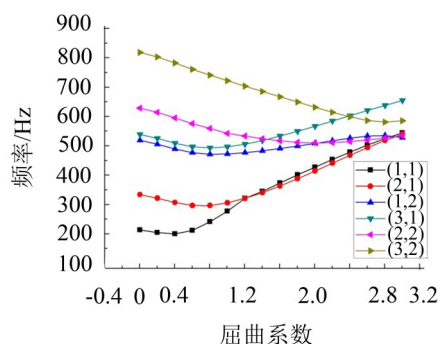


图 3 考虑材料和几何非线性时,固有频率随温度变化曲线

可以看出,对于低阶模态,平板固有频率的整个变化过程可以分为两个阶段,下降阶段和上升阶段;在第 1 个阶段中,固有频率随着温度的升高而减小,在第 2 个阶段中,固有频率随温度升高而增大。

根据上述分析以及式(2)可知,热效应导致材料弹性模量减小、固支板内产生的残余压应力均会产生负的附加刚度,进而降低结构的固有频率。同时,平板在受热过程中逐渐变形,且随着温度增加,平衡位置的中面挠度越来越大,如式(3)所示,非线性几何形变将导致正的附加结构刚度产生,使固有频率增大。根据式(1),最终刚度由常温下结构传统刚度和以上三个因素共同决定。

在下降阶段,热变形并不明显,此时热应力及材料特性的变化对结构刚度的影响较大,因此随着温度升高,固有频率逐渐降低;温度继续上升,热变形产生的刚度硬化逐渐增强,直至与热应力和材料特性变化产生的刚度软化效果相平衡,固有频率第一次达到极小值,下文将此极小值点定义为平衡点,对应温度定义为平衡点温度。此后,非线性变形产生的刚度硬化起主要作用,固有频率曲线回升。

本文通过在 Abaqus 软件中添加初始缺陷的方式引入平板的热变形,根据文献[17]中论证可知,初始缺陷使得结构固有频率不会随着温度升高而减小



至零,同时平衡点温度低于其临界屈曲温度,亦即图3中固有频率最低点对应的屈曲系数小于1。

进一步分析图3可以发现,(1,1)与(2,1)阶振型、(3,1)与(2,2)阶振型、(1,2)与(2,2)阶振型、(3,1)与(3,2)阶振型、(1,1)与(1,2)阶振型、(2,1)与(2,2)阶振型之间先后发生了模态顺序互换现象。

屈曲后的薄板模态还会发生图4所示的振型渐变现象。以第1阶模态为例,在 $S=0$ 时,是(1,1)阶模

态;当 $S=1.2$ 时,原来的模态被分割为2个同相振动的模态(与第2阶模态存在差别),即这阶模态融合了第1阶模态和第2阶模态的特征。在温度继续升高时,第3阶模态(1,2)同样变成2个同相的振动模态。

### 2.3 热噪声复合载荷下平板的动力学响应分析

对不同温度下的均匀受热矩形平板施加一维行波声载荷,其声压幅值不随频率变化,如图5所示。

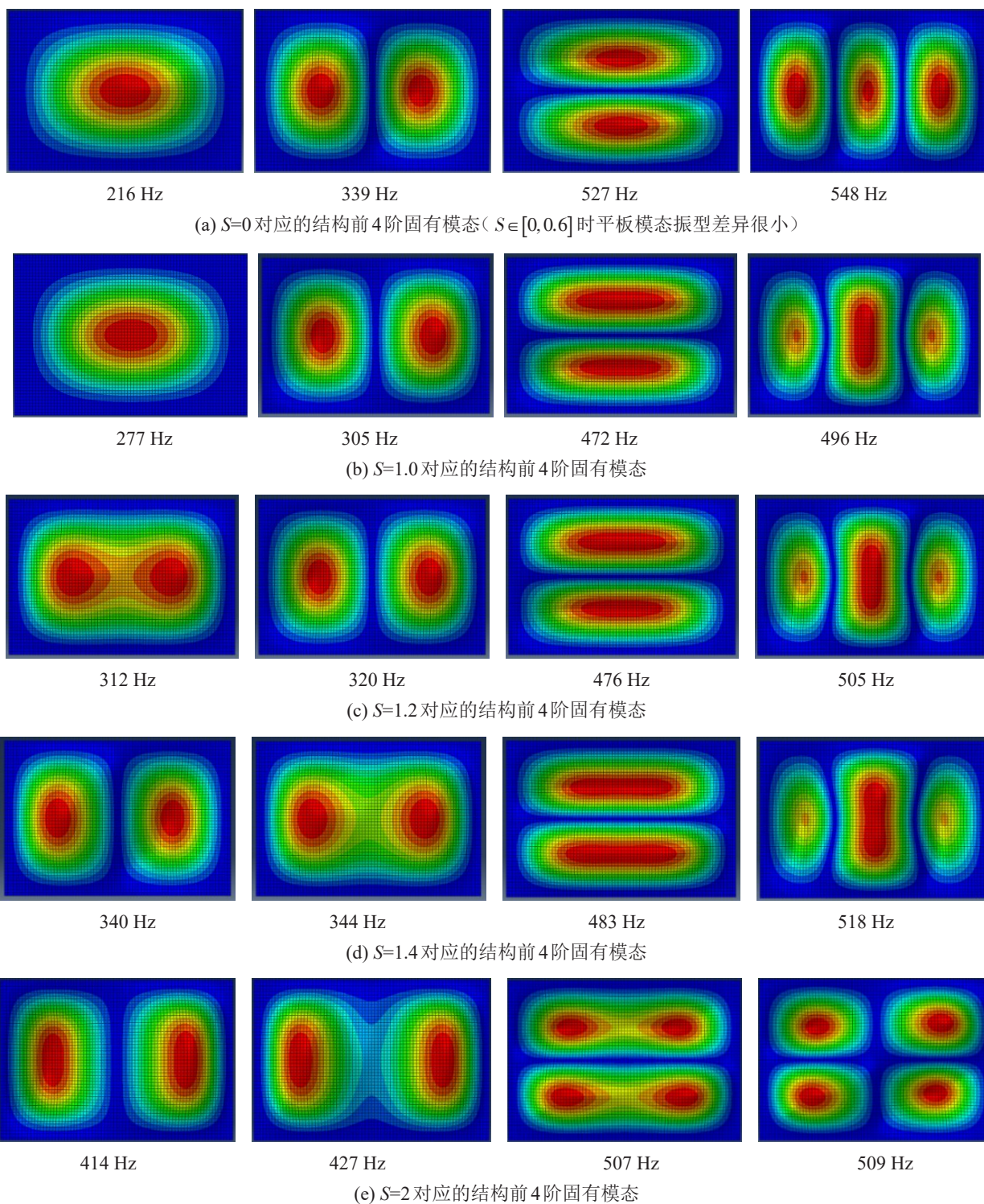


图4 模态振型渐变现象

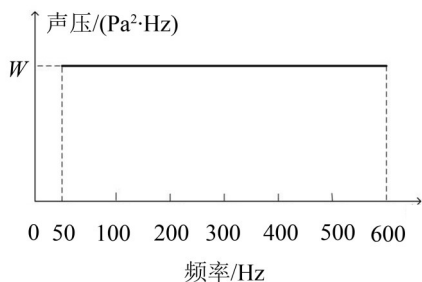


图5 噪声载荷功率谱

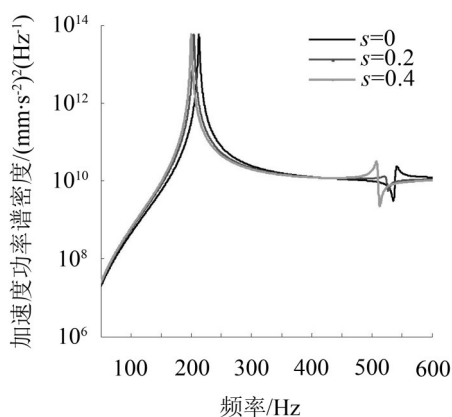
当  $W$  值取  $14\ 087.94\ \text{Pa}^2/\text{Hz}$  时,总声压级为  $162\ \text{dB}$ 。提取薄板中点和受载区域长四等分点的加速度响应分别如图6、图7所示。

结合图4所示的相应屈曲系数下平板的固有模态可以发现,在本节所研究的温度范围内,平板中点的加速度响应峰值均落在第(1,1)、(3,1)阶振型对应固有频率处;长四等分点的加速度响应峰值均落在(1,1)、(2,1)、(3,1)阶振型对应的固有频率处。除了长四等分点在屈曲系数  $S$  等于  $1.4$  时的1、2阶固有频率非常接近(分别为  $340\ \text{Hz}$  和  $344\ \text{Hz}$ ),响应曲线最大值对应的是第2阶固有频率以外,其余响应曲线均在(1,1)阶振型对应频率处取得最大值。由上述

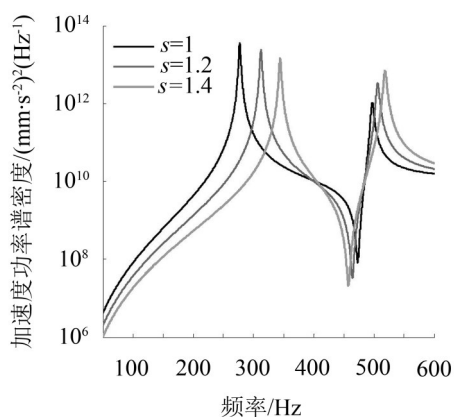
分析可知,平板在热噪声复合载荷下的加速度响应主要受其模态特性的影响。

进一步研究图6、图7,可以发现,达到平衡点温度之前,平板的动力学响应随着温度的升高逐渐向低频方向移动。达到平衡点温度之后,结构响应随温度增加向高频方向移动,这一变化趋势主要是由热环境下的固有频率特性决定的。同时可以发现,达到平衡点温度之后,相邻共振峰之间的间隔随温度升高而逐渐减小,共振峰向中间频率靠近。

当平板热膨胀受限制时,结构内部将有压力产生。达到平衡点温度之前,热应力导致的软化效应起决定性作用,结构刚度减小,位移响应幅值增加,同时,温度升高使得1阶共振峰出现的频率降低。对于稳定状态,加速度响应幅值等于位移幅值乘以响应频率的平方。因此,响应频率和位移幅值的变化使得加速度响应幅值有所波动。达到平衡点温度之后,应变硬化起决定性作用,结构刚度增大,位移幅值减小,同时,1阶共振峰出现的频率升高,响应频率和位移幅值的变化同样引起结构加速度响应幅值的波动。

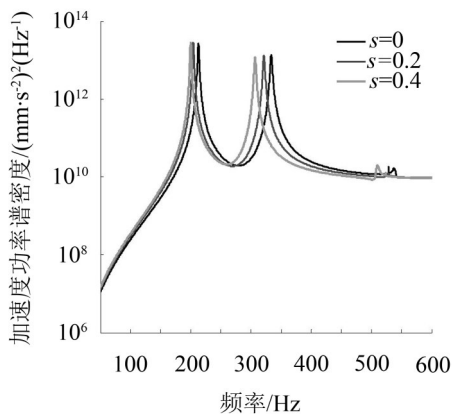


(a) 达到平衡点温度之前

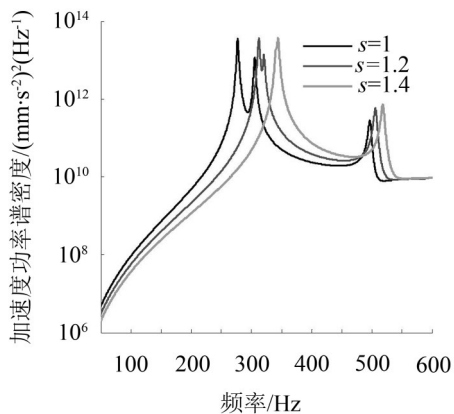


(b) 达到平衡点温度之后

图6 162 dB声压下受热薄板中点加速度响应功率谱密度



(a) 达到平衡点温度之前



(b) 达到平衡点温度之后

图7 162 dB声压下受热薄板长四等分点加速度响应功率谱密度



### 3 结 语

首先,本文基于薄板理论,从材料特性、热预应力、几何非线性变形三个方面研究了热效应对平板结构固有模态特性的影响。之后,以热模态计算结果为基础,采用解析方法计算了热环境中四边固支C/SiC复合材料平板在一维行波声场作用下的动力学响应,并从模态特征、频率变化、幅值变化等方面进行比较分析。获得结论如下:

(1) 结构温度的变化会引起材料特性的变化、导致残余应力以及几何变形,这些因素都会较大地影响四端固支平板的刚度特性,因此在研究四端固支平板的动力学特性时,需要综合考虑这些因素的影响。

(2) 达到平衡点温度之前,材料弹性模量的减小和热应力对于结构刚度的软化效应强于非线性几何变形的硬化效应,因此,随着温度升高,结构固有频率逐渐降低;达到平衡点温度之后,热变形的硬化效用强于热应力的软化效用,因此,随着温度升高,固有频率逐渐回升。

(3) 随着温度升高,两阶模态振型之间出现顺序互换现象;当温度高于临界屈曲温度后,平板的部分模态出现振型渐变现象。

(4) 平板在热噪声复合载荷下的加速度响应主要受其模态振型的影响。达到平衡点温度之前,平板的动力学响应随着温度的升高逐渐向低频方向移动;达到平衡点温度之后,结构响应峰值随温度增加向高频方向移动,且共振峰向中间频率靠近。

#### 参考文献:

- [1] 郭静,吴振强,张伟,等. 热噪声复合环境下飞行器结构动响应预示技术研究进展[J]. **强度与环境**, 2014, 41(6): 1-10.
- [2] 吴振强,任方,张伟,等. 飞行器结构热噪声试验的研究进展[J]. **导弹与航天运载技术**, 2010(2): 24-30.
- [3] GORDON R W, HOLLKAMP J J. Reduced-order models for acoustic response prediction[R]. AFRL-RB-WP-TR-2011-3040, 2011.
- [4] LIGUORE S L, PITT D M, WHITE E V. Air vehicle technology integration program (AVTIP) Delivery order 0086: applied nonlinear low order response prediction methods evaluation[R]. The Boeing Company, 2009.
- [5] LIGUORE S L, THOMAS M J, PITT D M. Application and demonstration of nonlinear reduced order modeling (NLROM) for thermal/acoustic response[C]. AIAA 2012-1626, 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics and materials conference, 2012.
- [6] 沙云东,朱林,栾孝驰,等. 带有温度梯度的热载荷与声载荷作用下薄板动态响应[J]. **振动与冲击**, 2014, 33(18): 102-109.
- [7] 钟皓杰,沙云东,魏静. 加筋板在热噪声载荷作用下的非线性动态响应分析[J]. **沈阳航空航天大学学报**, 2013, 30(6): 1-7.
- [8] 鲍冬冬,沙云东,蒋娜娜. 复合材料薄壁结构在热噪声载荷作用下的非线性动态响应特性分析[J]. **沈阳航空航天大学学报**, 2013, 30(1): 39-42.
- [9] 吴振强,程昊,张伟,等. 热环境对飞行器壁板结构动特性的影响[J]. **航空学报**, 2013, 34(2): 334-342.
- [10] 贺尔铭,刘峰,胡亚琪,等. 热噪声载荷下薄壁结构非线性振动响应分析及疲劳寿命预测[J]. **振动与冲击**, 2013, 32(24): 135-139.
- [11] A YU GOLUBEV. Experimental estimate of wave spectra of wall pressure fluctuations of the turbulent boundary layer in the subconvective region[J]. **Acoustical Physics**, 2012, 58(4): 396-403.
- [12] MAXIT L. Wavenumber space and physical space responses of a periodically ribbed plate to a point drive: A discrete approach[J]. **Applied Acoustics**, 2009, 133(1): 146-160.
- [13] MAXIT L, DENNIS V. Prediction of low induced sound and vibration of periodically stiffened plate[J]. **The Journal of the Acoustical Society of America**, 2013, 133(1): 146-160.
- [14] BIRGERSSON F, FINNVEDEN S, NILSSON C-M. A spectral super element for modelling of plate vibration. Part 1: general theory[J]. **Journal of Sound and Vibration**, 2005(287): 297-314.
- [15] BIRGERSSON F, FINNVEDEN S. A spectral super element for modelling of plate vibration. Part 2: turbulence excitation[J]. **Journal of Sound and Vibration**, 2005, 287: 315-328.
- [16] MOOSRAINER M. Acoustic excitation of structures[A]. In CAD-FEM Users Meeting Internationale FEM-Technologietage, Friedrichshafen[C]. 2000.
- [17] GENG Q, WANG D, LIU Y, et al. Experimental and numerical investigations on dynamic and acoustic responses of a thermal post-buckle plate[J]. **Sci China Tech Sci**, 2015, 58: 1414-1424.