

考虑应变依赖性的硬涂层复合结构 有限元分析

孙伟, 刘莹, 李晖

(东北大学 机械工程与自动化学院, 沈阳 110819)

摘 要: 在简要介绍硬涂层材料应变依赖性的基础上, 推导了用迭代有限元法求解硬涂层复合结构动力学特性的原理, 进一步提出了求解硬涂层复合结构固有频率和振动响应的计算流程, 即由振动响应值来修正硬涂层材料参数, 进而迭代求解硬涂层复合结构的动力学参数。最后以一个涂敷 $\text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3$ 硬涂层的悬臂梁为例进行了实例研究, 在考虑 $\text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3$ 硬涂层材料应变依赖性的基础上, 获得了不同激励幅度下悬臂梁的固有频率和振动响应, 并与线性计算结果进行了对比。结果表明: 该硬涂层复合结构悬臂梁具有软式非线性, 同时, 对应于不同的激励幅度, 迭代计算获得的共振响应相对于线性计算值减少了 29%~48%, 说明硬涂层材料的应变依赖性会进一步增强硬涂层的减振效果。

关 键 词: 应变依赖性; 硬涂层; 复合结构; 有限元分析; 迭代计算

中图分类号: V231.92; TH113.1

文献标志码: A

Finite element analysis of hard-coating composite structure considering strain-dependent characteristic

SUN Wei, LIU Ying, LI Hui

(School of Mechanical Engineering and Automation,
Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: On the basis of introducing the strain-dependent characteristic of hard-coating material, the dynamic characteristic solution theory of iterative finite element method was derived. Moreover, the processes of calculating natural frequency and vibration response were presented, which can be summarized as: the hard coating material parameters were corrected by the vibration response, and then the dynamic parameters were solved by the iterative solution program. At last, a cantilever beam coated with $\text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3$ hard coating was chosen to display the effectiveness of the proposed method. Considering the strain-dependent characteristic of $\text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3$ hard coating, the natural frequency and vibration response were obtained under different exciting levels and also compared with the relative values obtained by linear calculation. Results show that the hard-coating composite structure cantilever beam displays the soft nonlinear phenomenon, and the resonance responses reduce by 29%—48% compared with linear calculation correspondingly to different exciting levels. This shows that the strain-dependent characteristic of hard-coating material can promote the effect of vibration reduction.

Key words: strain-dependent characteristic; hard-coating; composite structure;
finite element analysis; iterative calculation

收稿日期: 2014-03-18

基金项目: 国家自然科学基金(51375079); 中央高校基本科研业务费专项资金(N140301001)

作者简介: 孙伟(1975—), 男, 辽宁营口人, 副教授, 博士, 主要从事机械系统动力学及振动控制研究。

在航空发动机、燃气轮机等动力机械装备中存在着大量的薄壳类构件,例如叶片、叶轮、轮盘、套筒等.这些薄壳类构件在气动场、惯性力场、机械振动场等多场耦合环境作用下,经常由于振动超标而影响动力设备的工作效率,更严重的情况是由于振动疲劳(尤其是高周振动疲劳)而发生失效.

硬涂层是由金属或陶瓷制成的涂层材料,目前主要用于热障^[1-2]、抗摩擦^[3]和抗腐蚀^[4].近年来的研究发现,硬涂层可以在高温、高腐蚀环境下降低薄壳类构件的振动应力,因而硬涂层阻尼减振研究受到了越来越广泛关注^[5-7].硬涂层材料具有独特的力学特点,其弹性模量会随着系统激励幅度的不同而发生改变,称之为应变依赖性.这种现象已被众多研究者所发现^[8-10],且提出采用振动梁法^[11]来辨识具有应变依赖性的硬涂层材料力学特性参数.硬涂层材料的非线性致使硬涂层复合结构也表现出非线性的力学特点.

在硬涂层阻尼减振研究中,创建出涂敷硬涂层材料的复合结构的动力学模型具有重要的意义.一个能够预估硬涂层复合结构动力学特性的力学模型是硬涂层减振优化设计的基础.但是,由于硬涂层材料具有上述力学特点,使创建这个力学模型变得非常困难.目前,关于硬涂层复合结构的分析模型多为从微观角度出发的材料学模型,例如,Tassini等^[12]提出用现象学模型来表征硬涂层微观结构的阻尼行为.Abu Al-Rub等^[13]用描述体积单元从微观角度仿真了硬涂层材料的应变依赖性以及耗能原理.这些材料学模型可对硬涂层的耗能机理给予了必要的解释,但是完全依赖于这些材料学模型指导硬涂层阻尼减振设计是不现实的.因而,迫切地需要基于宏观振动学,提出考虑硬涂层材料应变依赖性的硬涂层复合结构建模与分析方法.

本文正是基于上述需求开展研究,提出采用迭代有限元来分析硬涂层复合结构振动特性的方法.在简要介绍硬涂层材料应变依赖性的基础上,推导了有限元法的求解原理.进一步,提出了求解硬涂层复合结构固有频率和振动响应的计算流程.最后,以一个涂敷 $\text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3$ 硬涂层的悬臂梁为例进行了实例研究,在考虑 $\text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3$ 硬涂层材料参数应变依赖性的基础上,确定了复合结构悬臂梁的振动特性.分析结果可为进一步深入研究硬涂层的减振机理提供参考.

1 考虑应变依赖特性的硬涂层复合结构有限元分析求解原理

硬涂层的弹性模量用复模量 E_c^* 来表示,所述的应变依赖性可以用如下公式来描述:

$$E_c^* = E_c'(\epsilon_e) + iE_c''(\epsilon_e) \quad (1)$$

这里 * 号表示复数, $E_c'(\epsilon_e)$, $E_c''(\epsilon_e)$ 分别表示储能模量和耗能模量,且均为当量单向应变 ϵ_e 的函数.为简化起见,硬涂层具有应变依赖性的复模量可以用多项式来表达^[14],式(1)中的储能模量和耗能模量可以表达为

$$E_c'(\epsilon_e) = E_{R,0} + \epsilon_e E_{R,1} + \epsilon_e^2 E_{R,2} + \epsilon_e^3 E_{R,3} + \dots \quad (2)$$

$$E_c''(\epsilon_e) = E_{I,0} + \epsilon_e E_{I,1} + \epsilon_e^2 E_{I,2} + \epsilon_e^3 E_{I,3} + \dots \quad (3)$$

这里 $E_{R,0}$, $E_{I,0}$ 表示不考虑应变依赖性时涂层的储能模量及耗能模量,而 $E_{R,n}$, $E_{I,n}$ ($n=1,2,3,\dots$) 表示考虑应变依赖性时储能模量及耗能模量的拟合系数.因而,综合式(1)~式(3),考虑应变依赖性的硬涂层复模量又可以表示为

$$E_c^* = E_{c0}^* + E_{c,1}^* \epsilon_e + E_{c,2}^* \epsilon_e^2 + E_{c,3}^* \epsilon_e^3 + \dots \quad (4)$$

这里

$$E_{c,0}^* = E_{R,0} + iE_{I,0} \\ E_{c,n}^* = E_{R,n} + iE_{I,n} \quad n=1,2,3,\dots \quad (5)$$

硬涂层复合结构的有限元方程可表示为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}^* \mathbf{x} = \mathbf{F} \quad (6)$$

式中 $\mathbf{M}$ 为质量矩阵, $\mathbf{x}$, $\ddot{\mathbf{x}}$ 分别为节点位移向量和加速度向量, $\mathbf{K}^*$ 为复刚度矩阵, $\mathbf{K}^* = \mathbf{K} + i\mathbf{D}$, 其中 $\mathbf{K}$ 为复刚度矩阵的实部, $\mathbf{D}$ 为结构阻尼矩阵, $\mathbf{F}$ 为激振力向量.

由于硬涂层材料具有应变依赖性,式(6)中的刚度矩阵需要特殊考虑.在有限元模型中每个单元都有不同的应变状态,因而需要分别求解每个单元的刚度矩阵,再进行组合获得复合结构的复刚度矩阵,求解式可表达为

$$\mathbf{K}^* = \mathbf{K}_0^* + \sum_j \frac{\mathbf{K}_{j,0}^* (E_{c,1}^* \epsilon_{e,j} + E_{c,2}^* \epsilon_{e,j}^2 + E_{c,3}^* \epsilon_{e,j}^3 + \dots)}{E_{R,0}} \quad (7)$$

式中 $\mathbf{K}_0^*$ 为不考虑涂层材料应变依赖性时系统的总刚度矩阵, $\mathbf{K}_{j,0}^*$ 为第 j 个涂层单元应变为 0 时的刚度矩阵, $\epsilon_{e,j}$ 为第 j 个涂层单元的当量单向应变.可按照应变能密度相等的原则获得单元的当量单向应变 $\epsilon_{e,j}$, 求解式为

$$\epsilon_{e,j} = \sqrt{\mathbf{x}_j^T \frac{\mathbf{K}_{j,0}}{E_{R,0} V_j} \mathbf{x}_j} \quad (8)$$

式中 $\mathbf{x}_j$ 为第 j 个单元节点位移向量, V_j 为第 j 个涂层单元的体积。

假设在考虑硬涂层材料应变依赖性的前提下仍可按照模态理论进行求解, Φ_N 为复合系统的正则振型矩阵, 且不随着系统应变值的不同而发生改变. 利用正则振型矩阵对式(6)进行变换可获得复合系统在正则坐标下的运动方程, 可表达为

$$(\mathbf{K}_N^* - \omega^2 \mathbf{I}) \mathbf{q} = \mathbf{F}_N \quad (9)$$

其中

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_N^* &= \Phi_N^T \mathbf{K}^* \Phi_N = \mathbf{K}_{0,N}^* + \\ &\sum_j \frac{\Phi_N^T \mathbf{K}_{j,0} \Phi_N}{E_{R,0}} (E_{c,1}^* \epsilon_{e,j} + E_{c,2}^* \epsilon_{e,j}^2 + E_{c,3}^* \epsilon_{e,j}^3 + \dots) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\mathbf{F}_N = \Phi_N^T \mathbf{F} \Phi_N \quad \mathbf{K}_{0,N}^* = \Phi_N^T \mathbf{K}_0^* \Phi_N \quad (11)$$

式(9)中 ω 为激振频率, $\mathbf{I}$ 为与系统维数相一致的单位矩阵, $\mathbf{q}$ 为正则坐标下的振动响应。

求解硬涂层复合结构固有频率时, 可基于

$$|\mathbf{R}(\mathbf{K}_N^*) - \omega_n^2 \mathbf{I}| = 0 \quad (12)$$

进行迭代求解, 这里 $\mathbf{R}(\cdot)$ 表示求实部, ω_n 为第 n 阶固有频率, 详见后续计算流程。

而求解考虑应变依赖性的硬涂层复合结构振动响应即是求解非线性代数方程式(9)解的问题, 这里采用牛顿-拉夫逊方法来求解, 将式(9)化为

$$\begin{aligned} \mathbf{r} &= (\mathbf{K}_N^* - \omega^2 \mathbf{I}) \mathbf{q} - \mathbf{F}_N = \\ &(\mathbf{K}_{0,N}^* - \omega^2 \mathbf{I}) \mathbf{q} - \mathbf{F}_N + E_{c,1}^* \sum_j \sqrt{\frac{\mathbf{q}^T \mathbf{h}_j \mathbf{q}}{V_j}} \mathbf{h}_j \mathbf{q} + \\ &E_{c,2}^* \sum_j \frac{\mathbf{q}^T \mathbf{h}_j \mathbf{q}}{V_j} \mathbf{h}_j \mathbf{q} + E_{c,3}^* \sum_j \left(\frac{\mathbf{q}^T \mathbf{h}_j \mathbf{q}}{V_j} \right)^{\frac{3}{2}} \mathbf{h}_j \mathbf{q} \end{aligned} \quad (13)$$

式中 $\mathbf{r}$ 为残值向量。

$$\mathbf{h}_j = \frac{\Phi_N^T \mathbf{K}_{j,0} \Phi_N}{E_{R,0}} \quad (14)$$

由于未知数 $\mathbf{q}$ 是一个复数向量, 在求解雅克比矩阵 $\mathbf{J}$ 时需要分离实部及虚部, 雅克比矩阵 $\mathbf{J}$ 的求解式为

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}(\partial \mathbf{r} / \partial \mathbf{q}_R) & \mathbf{R}(\partial \mathbf{r} / \partial \mathbf{q}_I) \\ \mathbf{I}(\partial \mathbf{r} / \partial \mathbf{q}_R) & \mathbf{I}(\partial \mathbf{r} / \partial \mathbf{q}_I) \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \mathbf{q}_R} &= \mathbf{K}_N^* - \omega^2 \mathbf{I} + \\ &\sum_j \left[\left(\frac{E_{c,1}^*}{V_j \epsilon_j} + \frac{2E_{c,2}^*}{V_j} + \frac{3E_{c,3}^* \epsilon_j}{V_j} \right) \mathbf{h}_j \mathbf{q} \mathbf{R}(\mathbf{h}_j \mathbf{q})^T \right] \end{aligned} \quad (16)$$

$$\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \mathbf{q}_I} = \mathbf{i}(\mathbf{K}_{c,N}^* - \omega^2 \mathbf{I}) +$$

$$\sum_j \left[\left(\frac{E_{c,1}^*}{V_j \epsilon_j} + \frac{2E_{c,2}^*}{V_j} + \frac{3E_{c,3}^* \epsilon_j}{V_j} \right) \mathbf{h}_j \mathbf{q} \mathbf{I}(\mathbf{h}_j \mathbf{q})^T \right] \quad (17)$$

式中 $\mathbf{q}_R$ 和 $\mathbf{q}_I$ 分别表示正则坐标下振动响应的实部和虚部, 运算符 $\mathbf{I}(\cdot)$ 代表求虚部。

则方程(13)的牛顿-拉夫逊迭代公式为

$$\bar{\mathbf{r}}^{(n)} + \mathbf{J}^{(n)} \cdot \Delta \bar{\mathbf{q}}^{(n)} = 0 \quad (18)$$

$$\bar{\mathbf{q}}^{(n+1)} = \bar{\mathbf{q}}^{(n)} + \Delta \bar{\mathbf{q}}^{(n)} \quad (19)$$

其中

$$\bar{\mathbf{r}} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}(\mathbf{r}) \\ \mathbf{I}(\mathbf{r}) \end{bmatrix} \quad \bar{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}(\mathbf{q}) \\ \mathbf{I}(\mathbf{q}) \end{bmatrix} \quad (20)$$

在迭代公式(18)中, 通过向量 $\bar{\mathbf{r}}$ 的最大范数来设置迭代的终止条件. 在达到计算终止条件后, 利用计算得到的 $\bar{\mathbf{q}}$ 以及物理坐标与正则坐标的函数关系 $\mathbf{x} = \Phi_N \mathbf{q}$ 来获得最终的节点位移。

2 考虑应变依赖性的复合结构有限元分析求解流程

在考虑应变依赖性的前提下, 利用迭代法求解硬涂层复合结构的固有频率和振动响应, 其迭代计算思路可概括为: 由振动响应值来修正硬涂层材料参数, 进而迭代求解硬涂层复合结构的动力学参数。

2.1 固有频率的计算流程

固有频率的计算可参照图1所示的流程, 其中, 部分关键步骤解释如下:

步骤1 中固有频率初值 $\tilde{\omega}_n$ 是在不考虑硬涂层材料应变依赖性的前提下获得的, 参考计算式为

$$|\mathbf{K} - \tilde{\omega}_n^2 \mathbf{M}| = 0 \quad (21)$$

步骤2 中正则坐标下的共振响应 $\tilde{\mathbf{q}}$ 同样是在不考虑涂层材料应变依赖性的前提下获得的, 设激振频率为 $\tilde{\omega}_n$, 计算式为

$$(\mathbf{K}_{0,N}^* - \tilde{\omega}_n^2 \mathbf{I}) \tilde{\mathbf{q}} = \mathbf{F}_N \quad (22)$$

由于已获得正则坐标下的共振响应, 因而在步骤3中的单元当量应变计算时可将式(8)的计算式变为

$$\epsilon_{e,j} = \sqrt{\frac{\mathbf{q}^T \mathbf{h}_j \mathbf{q}}{V_j}} \quad (23)$$

第1次迭代计算时取 $\mathbf{q} = \tilde{\mathbf{q}}$ 。

在固有频率的迭代计算中, 每次都由新生

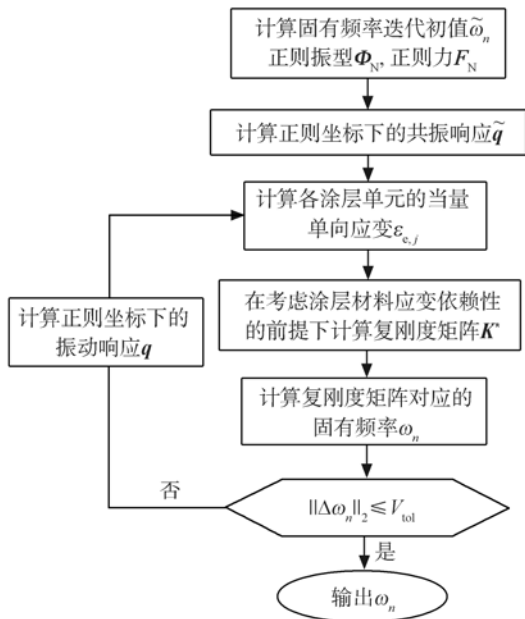


图1 硬涂层复合结构固有频率计算流程

Fig. 1 Flow of solving nature frequency of hard-coating composite structure

成的复刚度矩阵计算硬涂层复合结构的固有频率,其具体计算式参见式(12). 可以将固有频率变化的2范数定义为收敛条件,即当 $\|\Delta\omega_n\|_2 \leq V_{tol}$ 时停止计算,这里 V_{tol} 为决定计算精度的设定值. 当不满足收敛条件时,需要以获得的固有频率 ω_n 作为激振频率,重新计算正则坐标下的振动响应 q ,只是在迭代包中振动响应依据式(9)进行计算.

2.2 振动响应的计算流程

振动响应可按照图2所示的计算流程进行求解. 与固有频率的迭代计算相类似,同样也需要确定计算初值,进而将初值输入迭代程序包,在满足收敛条件的前提下获得节点振动响应的精确值. 部分关键步骤解释如下:

在步骤1中迭代初值可按照

$$(K_{0,N}^* - \omega^2 I) \tilde{q} = F_N \quad (24)$$

来求解. 可见在响应计算前需要获得复合结构的模态振型 Φ_N 以及模态力 F_N .

在迭代包中是利用牛顿-拉夫逊方法来计算节点正则坐标下的振动响应. 需要说明的是在考虑应变依赖性的前提下获得复刚度矩阵后需要进行正则坐标变换,进而输入到式(13)的残值向量计算式. 收敛条件定义为残值向量2范数小于设定值 V_{tol} .

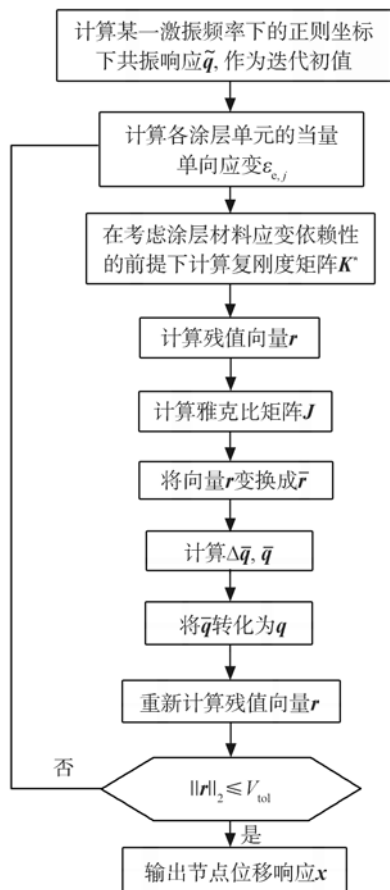


图2 硬涂层复合结构振动响应计算流程

Fig. 2 Calculation process of vibration response of hard-coating composite structure

3 研究实例

以下选取单面涂敷 $MgO + Al_2O_3$ 硬涂层的基梁来实践所研发的迭代有限元法. 基梁和硬涂层的相关尺寸及材料参数见表1.

表1 基梁和硬涂层的相关尺寸及材料参数

Table 1 Relevant dimensions and material parameters of base beam and hard coating

参数	材料类型	
	基体 Ti-6Al-4V	硬涂层 $MgO + Al_2O_3$
长度/mm	225	225
宽度/mm	20	20
厚度/mm	1.5	0.05
弹性模量/GPa	110.32	见图3
密度/(kg/m ³)	4420	3300

$MgO + Al_2O_3$ 硬涂层的弹性模量不是一个常数,具有应变依赖性,这里引入文献[15]中的测试

结果,见图3。

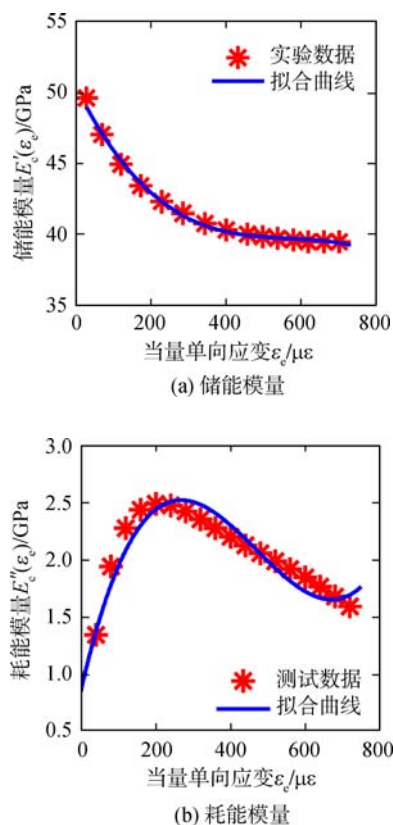


图3 具有应变依赖性的 MgO+Al₂O₃ 力学参数

Fig.3 Mechanical parameters of MgO+Al₂O₃ with strain-dependent characteristics

采用3次多项式对测试数据进行拟合,拟合曲线也列在图3中.获得的该硬涂层材料储能模量及耗能模量的表达式为

$$\begin{aligned} E'(\epsilon_e) &= 50.439 - 0.05386\epsilon_e + \\ &9.2396 \times 10^{-5}\epsilon_e^2 - 5.4190 \times 10^{-8}\epsilon_e^3 \\ E''(\epsilon_e) &= 0.9122 + 0.01321\epsilon_e - \\ &3.2997 \times 10^{-5}\epsilon_e^2 + 2.2086 \times 10^{-8}\epsilon_e^3 \quad (25) \end{aligned}$$

假设基梁处于悬臂状态,且在基础激励作用下,基础激励幅度的分别为 $g, 2g, 3g, 4g, 5g, 6g$ 和 $7g$,此处 g 为重力加速度.拾振点在梁的自由端端点处.

这里利用 ANSYS 软件进行悬臂梁动力特性的线性计算,并获取有限元方程式(6)中的质量矩阵、刚度矩阵和激励力向量.进一步,利用 Matlab 软件按照图1和图2所示的流程编制迭代有限元程序,计算该涂层梁在不同激励幅度下的共振频率和共振区附近的频域响应.这种两种软件相结合的计算思路,适合于将本算法应用于形状更加复杂的硬涂层复合结构件.

在 ANSYS 中所创建的有限元模型见图4,

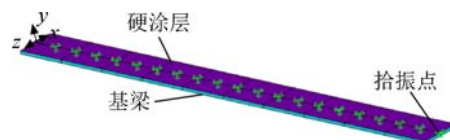


图4 硬涂层复合结构悬臂梁有限元模型

Fig.4 Finite element model of hard-coating composite structure cantilever beam

所选取的单元为 BEAM189,基梁与硬涂层各10个单元.

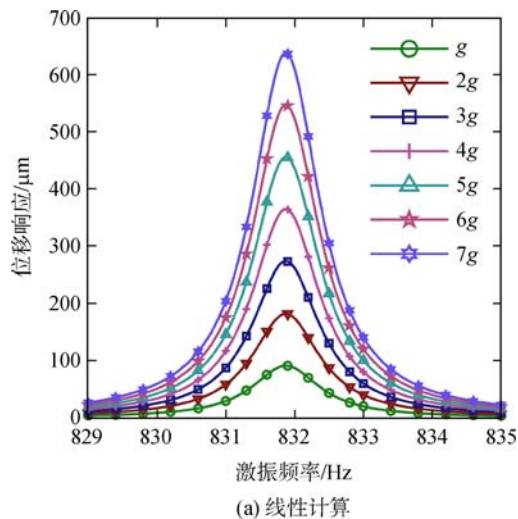
在线性计算时硬涂层材料参数为常值,取图3中应变为零时对应的储能模量及耗能模量,并将耗能模量换算为损耗因子,最终储能模量(弹性模量)取值为 50.439 GPa,损耗因子为 0.0181.计算获得的硬涂层复合结构悬臂梁前5阶固有频率见表2.

表2 硬涂层复合结构悬臂梁的前5阶固有频率

Table 2 The first five order nature frequencies of hard-coating composite structure cantilever beam

阶次	1	2	3	4	5
频率/Hz	24.15	151.30	423.81	831.87	1380.88

以下仅以第4阶为例,在考虑硬涂层材料应变依赖性的前提下进行迭代计算.为了比较,也采用线性计算获得了第4阶固有频率附近的频域响应.其中,共振区附近的频域响应见图5,共振响应列于表3中.需要说明的是,由于图3中仅给出 ϵ_e 小于 750 $\mu\epsilon$ 的硬涂层材料数据,因而在非线性迭代计算时,复合梁共振响应的 ϵ_e 不能超过 750 $\mu\epsilon$.本实例计算中,在 7g 基础激励作用下,拾



(a) 线性计算

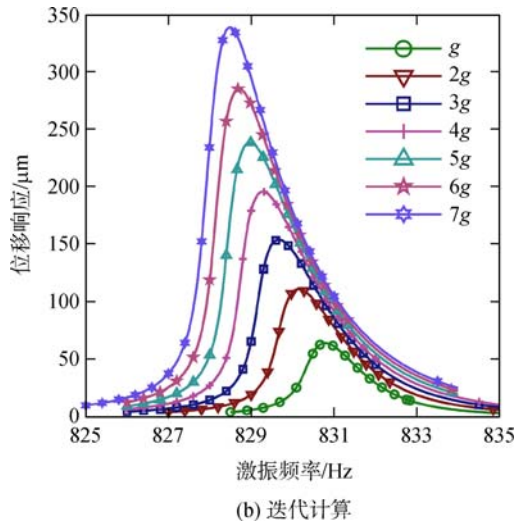


图 5 硬涂层复合结构悬臂梁第 4 阶共振区附近的频域响应

Fig. 5 Frequency domain response of hard-coating composit structure cantilever beam near the fourth-order resonance region

表 3 不同激励幅度作用下复合梁的第 4 阶共振频率及共振响应

Table 3 The fourth order resonance frequency and resonance response of composite beam under different exciting levels

激励幅度	计算类型	共振频率/Hz	共振响应/ μm
g	线性计算	831.87	91.03
	迭代计算	830.78	64.08
$2g$	线性计算	831.87	182.06
	迭代计算	830.14	111.17
$3g$	线性计算	831.87	273.09
	迭代计算	829.66	153.84
$4g$	线性计算	831.87	364.12
	迭代计算	829.28	195.63
$5g$	线性计算	831.87	455.15
	迭代计算	828.96	238.73
$6g$	线性计算	831.87	546.18
	迭代计算	828.70	285.44
$7g$	线性计算	831.87	637.21
	迭代计算	828.48	339.25

振点对应于共振响应的 ϵ_c 为 $744.196\mu\epsilon$,这也是本实例最高选择基础激励幅度为 $7g$ 的原因。

由图 5 可以看出,按照所研发的迭代算法,该硬涂层复合结构悬臂梁展示出软式非线性动力学

现象.文献[1-2]中描述的同类硬涂层试件也同样展示出软式非线性.表 4 进一步给出了不同激励幅度下硬涂层梁线性计算与迭代计算获得共振响应的比对计算结果,计算式描述为 $|(B-A)/A|$,其中 A 代表线性计算的共振响应值, B 代表迭代计算的共振响应值.从表 4 可知,对应于不同的激励幅度,考虑硬涂层材料应变依赖特性的迭代计算获得的共振响应相对于线性计算值减少了 $29\%\sim 48\%$,由此可见,硬涂层材料的应变依赖性会使硬涂层的减振效果进一步增强。

表 4 硬涂层复合结构悬臂梁线性计算与迭代计算获得共振响应的比较

Table 4 Resonance responses comparison between linear and iterative calculation of hard-coating composit structure cantilever beam

激励幅度	共振响应 计算偏差/%	激励幅度	共振响应 计算偏差/%
g	29.60	$5g$	47.55
$2g$	38.93	$6g$	47.74
$3g$	43.67	$7g$	47.76
$4g$	46.27		

4 结 论

1) 所研发的迭代有限元程序,由振动响应值来修正硬涂层材料参数,从而实现在考虑硬涂层材料应变依赖性的基础上求解复合结构的动力学参数;

2) 在对硬涂层复合结构动力学特性求解过程中,可考虑将有限元分析软件 ANSYS 和所编制的 Matlab 程序相结合.其中,ANSYS 用于提取复合结构的质量、刚度矩阵和激振力向量.这种两种软件相结合的计算思路,适合于将本算法应用于形状更加复杂的硬涂层复合结构件;

3) 实践证明,对于文献[15]中给定的随应变变化的硬涂层材料参数,硬涂层复合结构悬臂梁显示出软式非线性特性,这与相关文献[1-2]的实验结论相一致;

4) 计算结果也显示,由于硬涂层材料的应变依赖性,会使复合结构的共振响应进一步降低.对于本文的研究实例,考虑硬涂层材料应变依赖特性的迭代计算获得的共振响应相对于线性计算值减少了 $29\%\sim 48\%$,这对结构件的减振是非常有利的.因而可以说,硬涂层材料的应变依赖性进一

步提高了硬涂层材料的减振效果。

参考文献:

- [1] Limarga A M, Duong T L, Gregori G, et al. High-temperature vibration damping of thermal barrier coating materials [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2007, 202(4): 693-697.
- [2] 胡浩炬, 张建宇, 杨晓光, 等. 等离子热障涂层失效机理的数值分析研究 [J]. *航空动力学报*, 2010, 25(5): 1085-1091.
HU Haoju, ZHANG Jianyu, YANG Xiaoguang, et al. Numerical study of failure mechanisms on plasma sprayed thermal barrier coatings [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2010, 25(5): 1085-1091. (in Chinese)
- [3] Grzesik W, Zalisz Z, Nieslony P. Friction and wear testing of multilayer coatings on carbide substrates for dry machining applications [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2002, 155(1): 37-45.
- [4] Hassani S, Bielawski M, Beres W, et al. Predictive tools for the design of erosion resistant coatings [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2008, 203(3): 204-210.
- [5] Blackwell C, Palazotto A, George T J, et al. The evaluation of the damping characteristics of a hard coating on titanium [J]. *Shock and Vibration*, 2007, 14(1): 37-51.
- [6] Ivancic F, Palazotto A. Experimental considerations for determining the damping coefficients of hard coatings [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2005, 18(1): 8-17.
- [7] Torvik P J. A slip damping model for plasma sprayed ceramics [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2009, 76(6): 061018. 1-061018. 8.
- [8] Lauwagie T, Lambrinou K, Patsias S, et al. Resonant-based identification of the elastic properties of layered materials: application to air-plasma sprayed thermal barrier coatings [J]. *NDT&E international*, 2008, 41(2): 88-97.
- [9] Patsias S, Saxton C, Shipton M. Hard damping coatings: an experimental procedure for extraction of damping characteristics and modulus of elasticity [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, 370(1): 412-416.
- [10] Reed S A, Palazotto A N, Baker W. Determining material properties of nonlinear materials from transient response [R]. ASME Paper IMECE2007-43518, 2007.
- [11] Sun W, Li H, Han Q. Identification of mechanical parameters of hard-coating materials with strain-dependence [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2014, 28(1): 81-92.
- [12] Tassini N, Patsias S, Lambrinou K. Ceramic coatings: a phenomenological modeling for damping behavior related to microstructural features [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, 442(1): 509-513.
- [13] Abu Al-Rub R K, Palazotto A N. Micromechanical theoretical and computational modeling of energy dissipation due to nonlinear vibration of hard ceramic coatings with microstructural recursive faults [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2010, 47(16): 2131-2142.
- [14] Torvik P J. Determination of mechanical properties of nonlinear coatings from measurements with coated beams [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2009, 46(5): 1066-1077.
- [15] Reed S A, Palazotto A N, Baker W P. An experimental technique for the evaluation of strain dependent material properties of hard coatings [J]. *Shock and Vibration*, 2008, 15(6): 697-712.

(编辑:王碧琚)