第 33 卷 专辑
2013 年 10 月

固体力学学报
CHINESE JOURNAL OF SOLID MECHANICS

Vol. 33 S. Issue
October 2013

基于间接迭代-热辐射边界处理新算法的典型 MTPS 结构缝隙热短路效应研究

张　博　李跃明*

（西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室，西安，710049）

摘　要　针对一般热传导中的非线性辐射边界条件问题，运用线性有限元热传导分析手段，提出了一种简单的间接迭代方法（Indirect Iteration Method，IIM），通过引入松弛因子改善其数值稳定性，并编制了相应的分析计算程序. 建立了一系列不同缝隙尺寸、不同涂层辐射率的典型 MTPS 蜂窝夹芯结构的热短路网格模型，采用上述 IIM 方法分析了各中网格模型稳态温度场分布. 探讨了缝隙和涂层辐射率对热短路效应的影响，结果表明考虑热短路效应 MTPS 的结构动力学特性会发生改变，建议金属热防护系统设计时应将隔热板之间的间隙控制在 3 mm 以内.

关键词　间接迭代，热辐射，热短路，动力学特性

0　引言

高速飞行的飞行器承受着强烈的气动加热，需要在飞行器表面铺设热防护结构保护机体内部的冷结构. 金属热防护系统以其独特性能成为了高超飞行器热防护系统的理想候选方案[1-3]. 然而，由于热防护系统先天的结构功能布置，会出现热短路现象. 热短路将严重影响整个系统的隔热性能. 一般认为有两个因素，可以显著诱导 MTPS 出现热短路现象：(1) 内部金属连接件，(2) 防热阵列之间的缝隙. Blosser M L 等[4,5]通过数值分析结合实验验证指出后者所造成的热短路效应更为明显.

金属热防护系统通过拼接隔热板，覆盖在飞行器表面形成防护层. 为安装拆卸方便，协调各隔热板之间变形，释放隔热板之间相互挤压而产生的局部应力等原因[7]，设计时预留隔热板之间的缝隙是不可避免的（如图 1）. 在防护瓦边缘处，隔热系统上下表面不存在隔热层，热量由外空间直接传到机身内部. 这样在防热构件底部边缘处温度将显著高于底部中心处的温度，此即热短路效应. 缝隙中夹杂高温空气层，该高温空气层对隔热板存在强烈的辐射热交换，导致缝隙附近结构温度较高[8]. 因而开展热辐射环境下，防热结构的隔热性能研究极为重要.

热传导的边界条件可分为线性边界条件和非线性边界条件. 有关的热传导差分法与有限元法著作

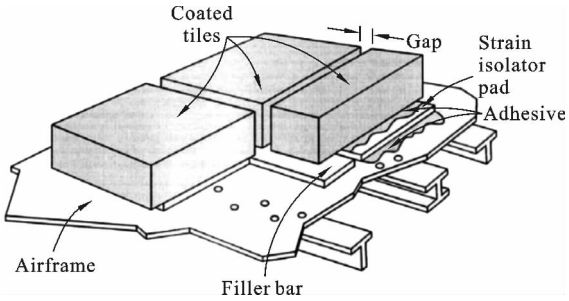


图 1　机身与 TPS 结构布局[6]

Fig. 1　Typical configurations of TPS and airframe

以及其他相关文献[9-11]，大都只涉及线性边界条件（Dirichlet、Neumann、Robin）的处理方法，而对于非线性边界条件如热辐射涉及较少. 目前，一般商用软件处理热辐射边界的方法均采用直接解法，即将域内的传热控制方程和线性边界条件以及非线性的辐射边界条件联立，用传统的有限元方法离散成非线性代数方程组，借助于高性能非线性求解器，通过求解与未知数四次方相关的非线性代数方程组，得到原问题的解. 这种方法：(1) 需要额外建立非常复杂的辐射热交换矩阵，(2) 依赖于高性能的非线性方程组求解器. 为了避开这两个困境，本文建议了处理这类问题的间接迭代解法（IIM）.

在热短路效应影响下结构内部存在较大的温度

* 通讯作者.　E-mail：liyueming@mail. xjtu. edu. cn.

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

梯度，特别是靠近边角处，导致结构内部产生挤压热应力，结构刚度下降. 因此热环境下 MTPS 的振动特性，在热防护系统设计阶段应得到充分重视. 本文建立了 MTPS 热短路网格模型，考虑典型再入阶段的传热分析，计算分析了热短路效应下不均匀温度场所导致的 MTPS 的热应力及动力学特性.

1 热辐射间接迭代解法的理论分析

1.1 间接迭代解法数值求解思路

以二维传热问题为例，热域需要满足的微分方程如下：

$$\rho c\frac{\partial \phi}{\partial t}-\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)-\frac{\partial}{\partial y}\left(k_y\frac{\partial \phi}{\partial y}\right)-\rho Q=0 \quad (\text{在 } \Omega \text{ 内}) \tag{1}$$

线性边界条件有 3 类：

$$\phi=\bar{\phi} \quad (\text{在 } \Gamma_1 \text{ 边界上}) \tag{2}$$

$$k_x\frac{\partial \phi}{\partial x}n_x+k_y\frac{\partial \phi}{\partial y}n_y=q \quad (\text{在 } \Gamma_2 \text{ 边界上}) \tag{3}$$

$$k_x\frac{\partial \phi}{\partial x}n_x+k_y\frac{\partial \phi}{\partial y}n_y=h(\phi_a-\phi) \quad (\text{在 } \Gamma_3 \text{ 边界上}) \tag{4}$$

经过有限元离散，对于稳态问题，可得到如下优先原方程：

$$K\phi=P \tag{5}$$

对于本文所关注的热辐射边界条件，根据斯蒂芬-波尔兹曼方程有：

$$k_x\frac{\partial \phi}{\partial x}n_x+k_y\frac{\partial \phi}{\partial y}n_y=F_{amb}\sigma\varepsilon_e(\phi_{amb}^4-\phi_\partial^4) \tag{6}$$

其中 F_{amb} 为结构辐射边界对周围环境的视系数，σ 为波尔兹曼常数，ε_e 为结构的辐射率，ϕ_{amb} 为环境温度，ϕ_∂ 为辐射边界处的温度.

间接迭代解法(IIM)的基本思路是将热辐射边界问题转化为若干个给定边界热流密度问题(第二类边界条件)来求解. 这种方法建立在线性边界条件处理的基础上，也可实现源代码的重用. 其具体步骤如下：

(1) 首先认为辐射边界处绝热(相当于第二类边界条件 $q=0$)；而对于其他线性边界条件如给定边界固定温度(第一类边界)、给定边界热流(第二类边界)、给定边界换热系数(第三类边界)仍按照线性有限元方法[11]进行处理，求解该问题获得迭代初始温度场 ϕ_0. 这一计算过程记作间接迭代的第 0 次迭代.

(2) 对于第 k ($k>=1$)次迭代，认为从辐射边界处流入的热流密度为：

$$q_k=F_{amb}\varepsilon\sigma(\phi_{amb}^4-\phi_{\partial_{k-1}}^4) \tag{7}$$

其中 $\phi_{\partial_{k-1}}$ 为第 $k-1$ 次迭代求出的温度场中辐射边界处的温度值，注意 $\phi_{\partial_{k-1}}\subset\phi_{k-1}$. 将该热流密度施加在结构上，其他线性边界条件处理方法保持不变. 求解该线性问题可以到第 k 次迭代层的温度场 ϕ_k. 反复执行这一过程，直至计算出的相邻的两温度场之间的误差满足精度要求.

(3) 最后，当迭代次数足够多可以期望得到一个收敛稳定的温度场. 即：

$$\lim_{n\to\infty}r_n=\lim_{n\to\infty}\frac{\|\phi_n-\phi_{n-1}\|_\infty}{\|\phi_n\|_\infty}=0 \tag{8}$$

1.2 间接迭代解法数值稳定性的改善

辐射热交换能量与绝对温度的四次方成正比，当环境温度较高，势必会导致上述迭代格式发散. 为充分暴露上述简单间接迭代格式不稳定的数值特性，进而改良 IIM 算法. 下面做了一系列算例.

计算模型如图 2 为一立方体，底面一条棱固定温度 100 ℃，顶面施加不同环境温度的辐射边界条件，其他边界绝热.

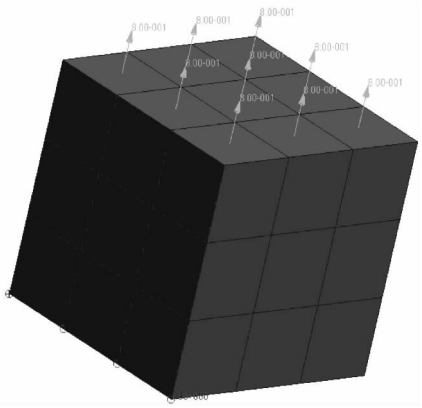


图 2 系列辐射算例模型

Fig. 2 Model of radiation simulation example

这里环境分别取 2500 ℃、3000 ℃、3500 ℃、和 4000 ℃. 使用间接迭代格式计算上述含有辐射边界的热传导问题. 得如图 3 所示的结果，发现不同环境温度下，模型温度分布模式基本相同只是数值上有所差别. 当环境温度小于等于 3500 ℃时本文计算结果与传统的直接解法结果吻合较好，但当环境温度为 4000 ℃时，采用 IIM 方法却无法获取收敛的解.

为改善简单间接迭代格式数值稳定性，本文尝试了引入松弛因子的方法. 其实质是缩小相邻两迭代步温度场的跳跃，以较多的迭代次数换取数值稳定性.

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

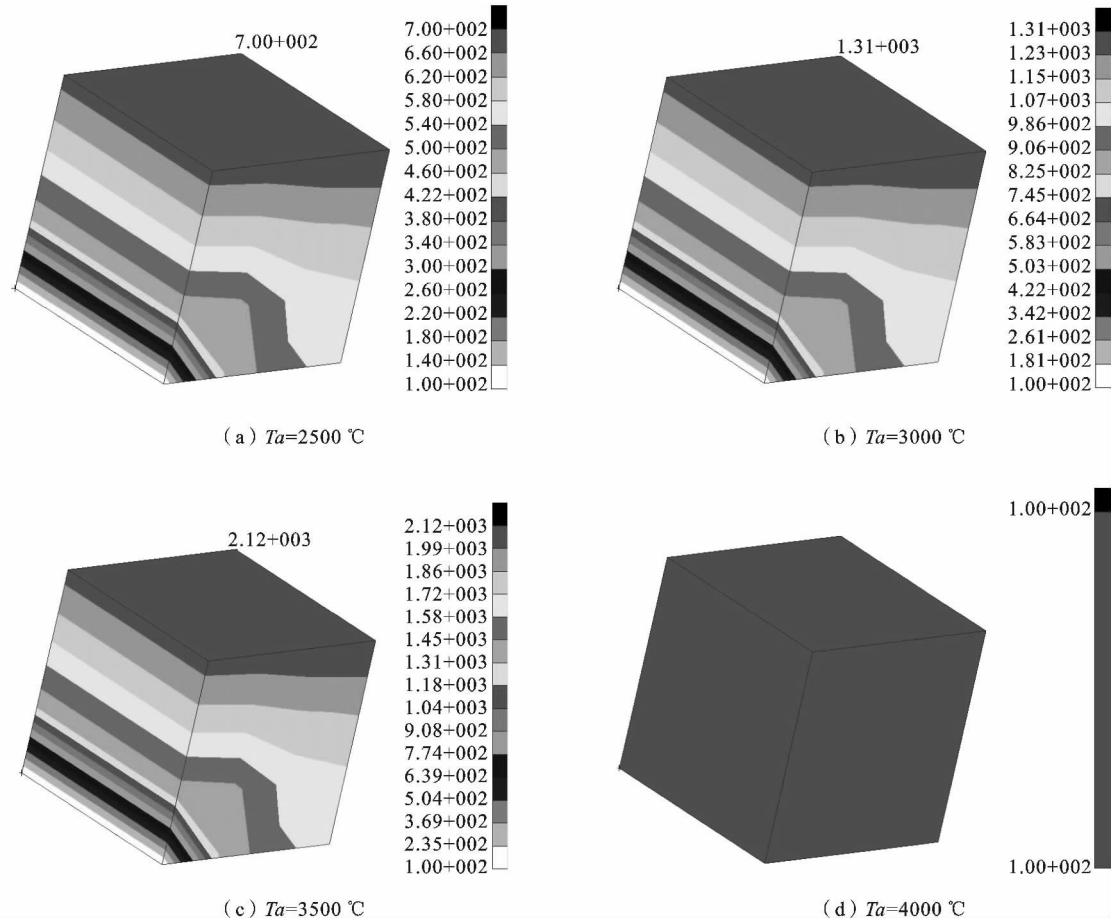


图 3　不同环境温度下采用 IIM 方法计算得到的温度场

Fig. 3　Temperature fields obtained by IIM under different ambient temperature

对于间接迭代格式中的第 k（$k=0$ 或 1）次迭代，仍按照原来的方法进行. 而第 k（$k>=2$）次迭代，将从辐射表面流入结构内部的热流修正为：

$$q_k=\beta F_{amb}\varepsilon\sigma(\phi_{amb}^4-\phi_{\partial_{k-1}}^4)+(1-\beta)F_{amb}\varepsilon\sigma(\phi_{amb}^4-\phi_{\partial_{k-2}}^4) \tag{9}$$

上式中的 β 为引入的松弛因子，通过调整该参数可以改变 IIM 的数值稳定性. 一般地，β 越小，迭代过程就越容易收敛，但收敛的越慢（需要更多的迭代次数），但是小的松弛因子，导致相邻两步温度场接近，可能会使得迭代过程过早终止；反之，迭代过程容易走向发散.

使用改进后的 IIM 方法，再次计算环境温度为 4000 ℃的算例，松弛因子 β 取 0.4，这里迭代了 4 次，其结果与 Nastran 计算结果的对比见图 4. 可见，获得了收敛的结果，并且最大误差不到 1%，精度较好.

2　热环境下结构热模态的理论分析

热环境对结构动力学特性的影响可以从两方面来考虑. 首先从材料性能变化来说，温度变化导致结构初始刚度矩阵变化. 热环境下结构初始刚度矩阵为：

$$\boldsymbol{K}_T=\int\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}_T\boldsymbol{B}\,\mathrm{d}\boldsymbol{\Omega} \tag{10}$$

其中 $\boldsymbol{B}$ 为几何矩阵，$\boldsymbol{D}_T$ 为与材料弹性模量 E 和泊松比 μ 相关的弹性矩阵. 其次，结构内部温度升高后，内部存在温度梯度引起了热应力，需要在结构的刚度矩阵中附加预应力矩阵

$$\boldsymbol{K}_\sigma=-\int\boldsymbol{N}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{s}_T\boldsymbol{N}\,\mathrm{d}\boldsymbol{\Omega} \tag{11}$$

其中 $\boldsymbol{N}$ 为形函数，$\boldsymbol{s}_T$ 为热应力矩阵.

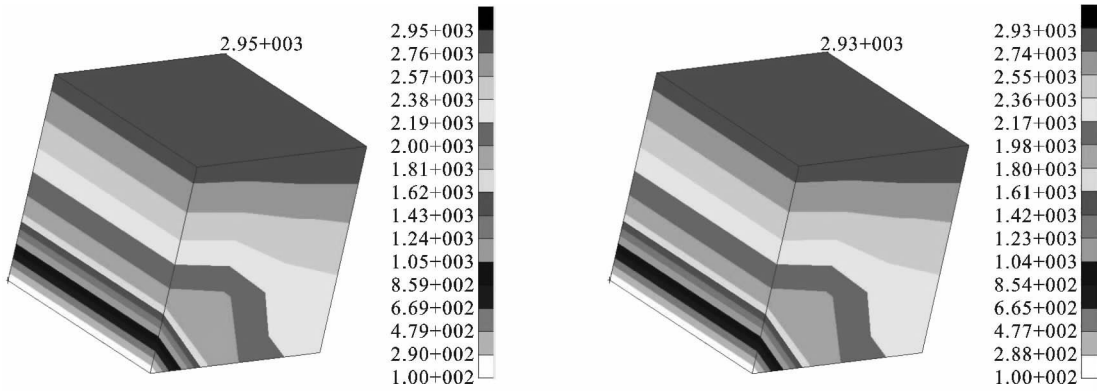
总之，热环境下结构刚度矩阵为：

$$\boldsymbol{K}=\boldsymbol{K}_T+\boldsymbol{K}_\sigma \tag{12}$$

考虑温度效应的结构模态分析即为求解广义特征值问题：

$$(\boldsymbol{K}-\omega^2\boldsymbol{M})\boldsymbol{\varphi}=0 \tag{13}$$

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a) Nastran的直接解法计算结果　　(b) IIM计算结果

图 4　环境温度 4000 ℃时直接解法和 IIM 解法获取的温度场

Fig. 4　Temperature fields obtained by direct method and IIM under ambient temperature 4000 ℃

3　MTPS 缝隙热短路效应分析

3.1　热短路效应的评价体系

热短路效应使得飞行器外部热量率先通过该热短路通道冲击机体内部，这样在给定的时刻，隔热层在同一厚度的截面内，温度出现差异. 热短路发生的区域附近，局部温度将远高于其他区域. 设计热防护系统时总是要依据最高温度来设计结构尺寸. 若热短路效应主宰整个热防护系统的隔热性能，将会导致设计出的结构大部分材料的热容没有充分利用，整个结构十分笨重，增加成本. 因此要严格控制热短路效应，避免其主宰整个隔热系统.

为了探索究竟哪些设计参数会影响到热短路效应，需要建立一个简单的衡量热短路效应强弱的指标. 当计算出某特定模型的温度场后，本文采用缝隙底部边角与结构底部中心温差的无量纲量来衡量热短路效应强弱. 即定义热短路因子

$$F=\frac{\phi_{\text{corner}}-\phi_{\text{center}}}{\phi_{\text{corner}}} \tag{14}$$

显然，F 越大热短路效应越明显.

3.2　计算模型

本文建立了考虑缝隙热短路的典型金属热防护结构的网格模型如图 5. 可通过调整隔热层间隙的大小而获取一系列模型. 这里所建立的金属热防护系统分析模型的主要构造分为三层：外蜂窝夹心层、中心纤维隔热层、内蜂窝夹心层. 其中内外蜂窝夹芯结构材料为镍铬合金(Inconel 617)，中间的隔热层为氧化铝纤维(Saffil)，其高度为 45 mm，整个面板尺寸为 200 mm×200 m. 参照国内外相关设计经验[12,13]，确定内外面板的几何尺寸. 如表 1 所示：

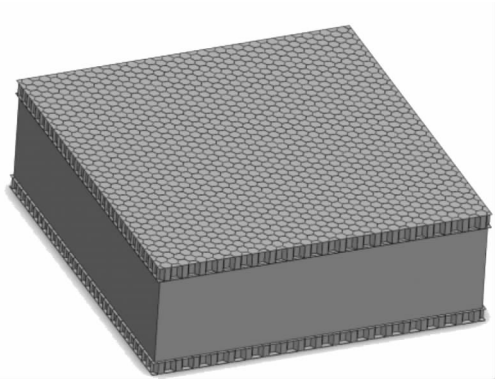


图 5　高级金属热防护结构几何模型

Fig. 5　Geometry model of advanced MTPS

表 1　内外蜂窝夹芯结构面板几何尺寸

Table 1　Geometries of outer and inner honeycomb sandwiches

	面板厚度	蜂窝内切圆直径	蜂窝芯高度	蜂窝壁厚
外蜂窝夹芯板	0.1 mm	6 mm	6 mm	0.1 mm
内蜂窝夹芯板	0.1 mm	6 mm	7 mm	0.1 mm

本文分别建立出隔热板间隙为 1、2、3、4、5、6、7 mm 共 7 组有限元网格模型进行传热分析，研究金属热防护系统由于缝隙辐射所导致的边缘热短路问题，图 6 所示为 3 mm 缝隙尺寸分析模型的缝隙局部放大图.

由于几何模型与周期性分布的边界条件都是对称的，因此在传热分析中仅取出热防护系统的 1/4 来计算. 使用六面体网格进行有限元剖分，得到各网格模型，单元数为 150727，节点数为 176431. 图 7 给

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

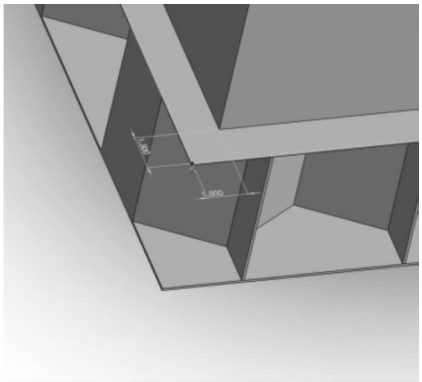


图 6　防热板阵列缝隙局部放大图

Fig. 6　Partial enlarged detail of geometry model

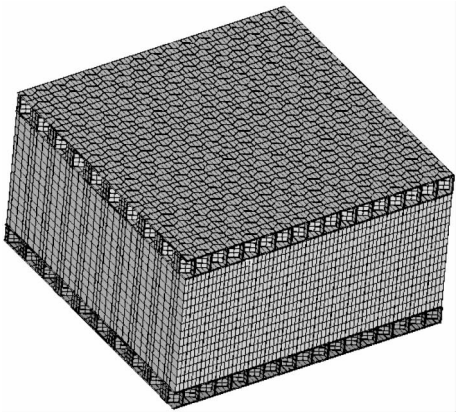


图 7　四分之一有限元模型

Fig. 7　A quarter of FE model of advanced MTPS

出了隔热板间隙距离为 3 mm 的有限元分析模型，图 8 所示为模型底部边角处预留缝隙的设计细节.

本文中涉及到 Inconel 617 和 Saffil 相关的热物理参数、结构弹性等物理参数见参考文献[4,7,14].

隔热板之间的间隙导致各金属热防护系统隔热

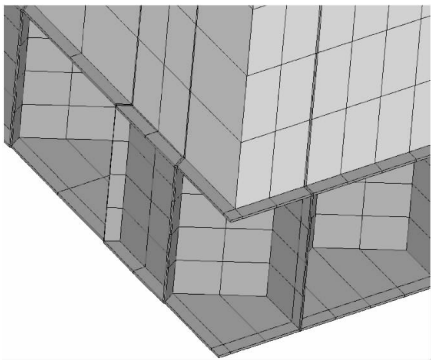


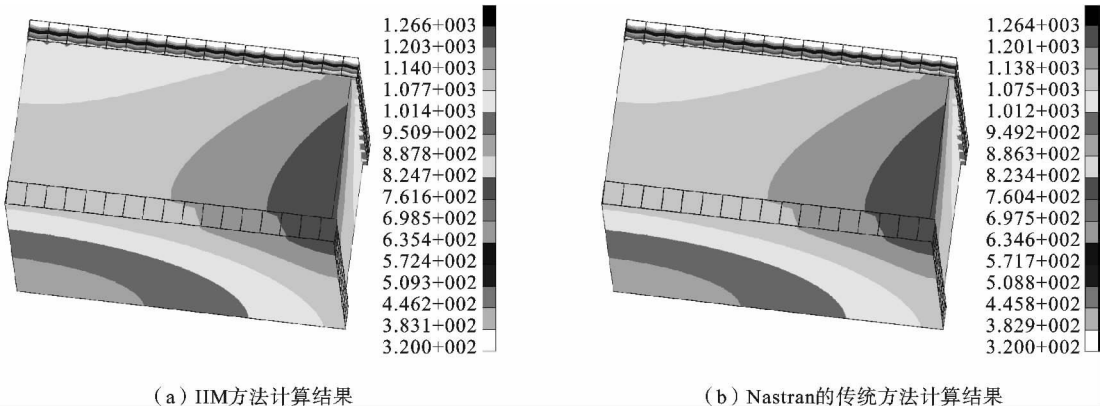
图 8　有限元模型局部放大图

Fig. 8　Partial enlarged detail of FE model

板之间产生了强烈的热辐射效应. 本研究采用文献中给出的再入阶段飞行器表面所承受的热载荷数据[15]，同时考虑热防护系统内层隔热板之间的辐射效应，通过求解高度非线性稳态传热问题探索间隙辐射对热防护系统传热特性的影响.

3.3　使用典型模型验证 IIM 方法

为了保证采用 IIM 方法来分析探索金属热防护系统热短路效应正确有效，本文首先分别采用传统直接解法和 IIM 方法分析典型模型（缝隙尺寸为 3 mm，表面涂层辐射率为 0.2）再入阶段稳态温度场，得到的温度场云图如图 9，对比两者发现最大误差不超过 0.02%. 两个计算在同一平台下进行（Intel Core i3-2100 CPU with 2.99GB of memory, Windows XP Professional），IIM 使用了 77.031 秒（5 次迭代），而传统直接解法使用了 220.046 秒. 图 10 给出了调用 IIM 方法时，相邻两迭代步温度场的相对误差随迭代进行而衰减的过程. 由此可见使用 IIM 方法不仅具有足够精度，而且计算效率很高.



（a）IIM方法计算结果　　（b）Nastran的传统方法计算结果

图 9　典型热短路模型温度场

Fig. 9　Temperature fields of typical heat shorts model

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3.4 采用 IIM 方法分析其他热短路模型

为揭示缝隙尺寸、涂层辐射率对热防护系统隔热性能的影响，本文应用引入松弛因子（取 0.4）的 IIM 方法，计算了涂层辐射率分别为 0.2、0.4、0.6、0.8 四种情况下，缝隙尺寸分别为 1、2、3、4、5、6、7 mm 的模型在典型的再入热载荷作用下的温度场.

（1）各工况下，得到的温度分布云图基本相同，只是温度数值存在差异. 由于篇幅的限制，其他温度场分布图不再一一给出. 采用 3.1 节给出的热短路效应评价体系，由计算得到的各个温度场，计算各工况下的热短路效应指标 F，获得不同辐射率下，热短路效应 F 随缝隙宽度的变化规律，如图 11 所示. 可见，当缝隙尺寸小于 3 mm 时，热短路效应随缝隙宽度的增长率比较低，同时表面涂层的辐射率对结构热短路效应的影响不明显；当缝隙尺寸大于 3 mm 时，热短路效应随缝隙宽度的增长率剧增，且对涂层辐射率较为敏感；减小缝隙宽度是消除缝隙辐射、避免缝隙热短路最有效的方法；设计热防护系统时应尽量把阵列缝隙宽度控制在 3 mm 以内.

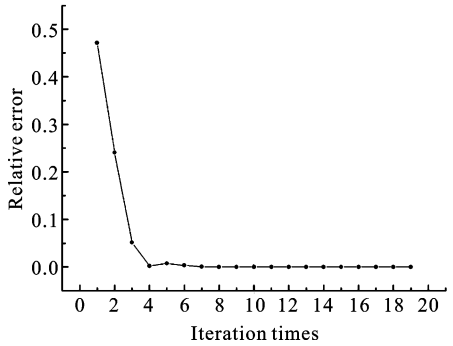


图 10 迭代步间的相对误差

Fig. 10 Relative error of adjacent two iterations

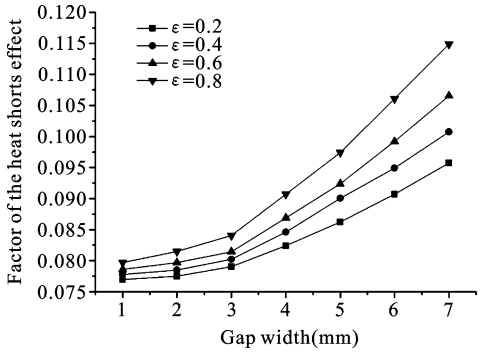


图 11 不同涂层辐射率下热短路效应与缝隙尺寸关系

Fig. 11 Relationship between heat shorts effect and gap width under different coating radiation rate

3.5 热短路效应下 MTPS 的热应力及热模态分析

本文取缝隙宽度为 3 mm 的整体模型为典型分析对象，采用 IIM 重新进行了典型再入阶段稳态温度场分析，以此为基础，给模型四个角落处施加与机身的螺栓连接约束分析了其在热环境下的热应力及热模态. 图 12、13 分别为不均匀温度场作用下，模型总位移场和应力场. 表 2 为考虑温度场与不考虑温度场时模型前 10 阶固有频率的对比. 图 14、15 分别为 3 mm 缝隙的 MTPS 模型在常温下和热短路效应下的第三阶振型. 整体考察结构前 10 阶固有振动，发现考虑温度效应影响时，结构的固有频率会降低 10%左右. 两种情况下结构整体振型接近，只是当存在温度场时模型的内外蜂窝夹芯板的上下面板靠近边缘处出现了局部模态，如图 15 所示. 这种现象可解释如下：结构受热膨胀后，内部微团相互挤压，刚度矩阵缩减，固有频率降低；结构振型本身只跟刚度矩阵和质量矩阵有关，这里质量矩阵不变，蜂窝夹芯板结构本身厚度小刚度低，加之边缘处温度梯度和挤压程度都较大，因而该处刚度缩减程度相对较大，振动更容易被激发，出现了局部模态.

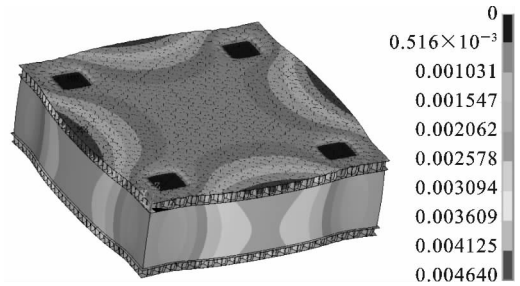


图 12 总位移场

Fig. 12 Displacement vector sum

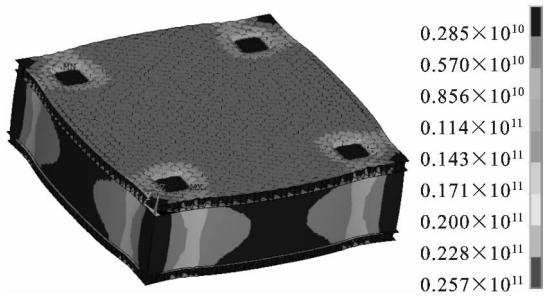


图 13 von mises 应力场

Fig. 13 Von mises stress

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

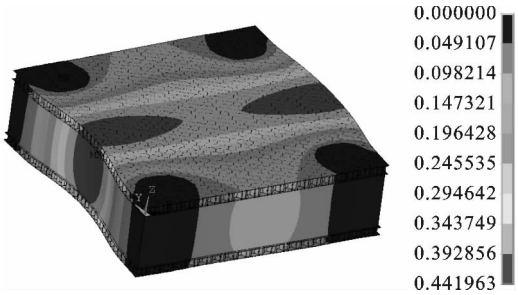


图 14　无热应力下 MTPS 的第三阶振型

Fig. 14　3rd modal of MTPS without thermal stress

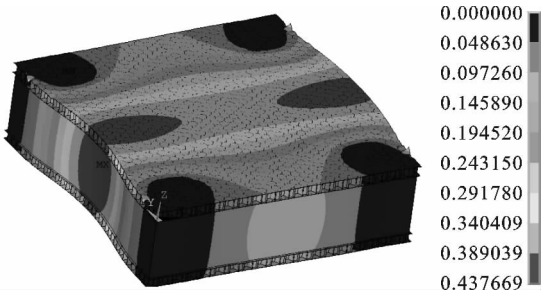


图 15　有热应力下第三阶振型

Fig. 15　3rd modal of MTPS with thermal stress

表 2　有无温度场模型前 10 阶固有频率对比

Table 2　Comparison of first 10 orders natural frequency between with and without thermal stress

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
不考虑温度固有频率 f_0(Hz)	725	1026	1033	1067	1075	1167	1448	1519	1696	1924
考虑温度固有频率 f_T(Hz)	618	906	949	956	990	1050	1359	1419	1593	1754
$(f_0-f_T)/f_0\times100\%$	14.8%	11.7%	8.1%	10.4%	7.9%	10.0%	6.1%	6.6%	6.1%	8.8%

4　结论

针对辐射边界计算，本文提出了高效的间接迭代方法(IIM)；对于金属热防护系统的热短路问题，本文以缝隙辐射所造成的热短路效应为主要矛盾，忽略支架和连接件对热短路的影响，进行了计算分析. 得到如下结论：

(1) 提出的衡量热短路效应强弱指标方法简单有效，能够正确反映热短路效应强弱.

(2) 当缝隙尺寸小于 3 mm 时，热短路效应随缝隙宽度的增长率比较低，同时表面涂层的辐射率对结构热短路效应的影响不明显；当缝隙尺寸大于 3 mm 时，热短路效应随缝隙宽度的增长率剧增，且对涂层辐射率较为敏感；减小缝隙宽度是消除缝隙辐射、避免缝隙热短路最有效的方法；设计热防护系统时应尽量把阵列缝隙宽度控制在 3 mm 以内.

(3) 本文提出的间接迭代解法(Indirect Iteration Method，IIM)，在处理热交换辐射非线性问题不仅具有较高精度而且计算效率提高了近 3 倍；为有限元方法中处理热辐射问题提供了新思路，也可引入到其他传热相关的数值分析方法(如差分法)中.

(4) 考虑缝隙热短路效应所产生的不均匀温度场，应力的最大值出现在缝隙边缘处，结构的固有频率会降低，本文算例降低了 10% 左右，表明在进行热防护系统设计中缝隙热短路效应需要重视.

参考文献

[1]　夏丰领，陈国光. 高速火箭弹的气动加热计算[J]. 华北工学院学报，2003，06：72-74.

[2]　高东岳. 飞行器金属热防护系统隔热毡受热分析[D]. 哈尔滨工程大学，2009.

[3]　解维华，张博明，杜善义. 金属热防护系统设计的有限元分析[J]. 航空学报，2006，05：166-171.

[4]　Blosser M L，Advanced Metallic Thermal Protection Systems for Reusable Launch Vehicles [D]. University of Virginia. 2000.

[5]　Blosser M L，Chen R R，Schmidt I H. Advanced Metallic Thermal Protection System Development [C]. AIAA 40th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit Reno，America，2002.

[6]　Callister W D. Materials Science and Engineering：An Introduction [M]. New York：John Wiley and Sons Inc.，2009.

[7]　Ng Wei H，Friedmann Perez P，Waas Anthony M. Thermomechanical Analysis of a Thermal Protection System with Defects and Heat Shorts [C]. 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures，Structural Dynamic，and Materials Conference Newport，Rhode Island，May 1-4，AIAA-2006-2212.

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[8] 解维华,孟松鹤,杜善义,韩杰才,张博明. 金属热防护系统边缘热短路研究[J]. 航空学报,2010,05:209-214.

[9] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社,2000.

[10] 陆金甫,关治. 偏微分方程数值解法[M]. 北京:清华大学出版社,2003.

[11] 王勖成. 有限单元法[M]. 北京:清华大学出版社,2003.

[12] 赵剑,谢宗蕻,张磊. 高温合金热防护系统设计与分析[J]. 宇航学报,2008,05:217-223.

[13] Liguore S L,Thomas M J,Pitt D M. Application and Demonstration of Nonlinear Reduced Order Modeling (NLROM) for Thermal/Acoustic Response [C]. AIAA 53rd Structures,Structural Dynamics and Materials Conference,2012.

[14] Zhu Huadong Design of Metallic Foams as Insulation in Thermal Protection Systems [D]. University of Florida,2004.

[15] David E Myers,Carl J Martin,Max L Blosser. Parametric weight comparison of advanced metallic,ceramic tile,and ceramic blanket thermal protection system[J]. NASA/TM-2000-210289.

STUDY ON GAP HEAT SHORTS EFFECTS OF MTPS STRUCTURE USING INDIRECT ITERATION METHOD FOR THERMAL RADIATION BOUNDARY

Bo Zhang Yueming Li

(*State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures*,*Xi'an Jiaotong University*,
28 *Xianning West Road*,*Xi'an*,710049)

Abstract A new method,Indirect Iteration Method (IIM),to deal with the boundary conditions of highly nonlinear thermal radiation of heat transfer is presented in this paper for the first time. The numerical stability of IIM was improved through the introducing relaxation factor. A computer program dealing with heat transfer containing radiation boundary was developed. A series MTPS gap heat shorts models with different gap widths and different gap coating radiations rate were constructed. By applying the IIM, the steady temperature distribution was analyzed. From these simulations,the relationship between heat shorts effects and the gap width under different coating radiation rate was explored. A serious effect on the characteristic of structural natural vibration considering heat shorts effects. The gap should be controlled in than 3 mm.

Key words indirect iteration method,heat radiation,heat short circuit,honeycomb core structure of MTPS

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net