

文章编号:1000-6893(2007)06-1345-06

# 再入飞行器多层隔热结构优化分析

赵玲, 吕国志, 任克亮, 李元林

(西北工业大学 504 教研室, 陕西 西安 710072)

## Structural Optimization of Multilayer Insulation for Reentry Vehicles

Zhao Ling, Lu Guozhi, Ren Keliang, Li Yuanlin

(Faculty 504, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**摘 要:** 针对可重复使用飞行器再入过程中热防护系统的复杂传热问题,采用有限元方法对可重复使用飞行器多层隔热结构(MLI)进行参数化求解,预测内部结构瞬态温度响应,对具 4 层反射屏的多层隔热结构进行优化设计,分析影响隔热性能的多个因素(如反射屏的分布,屏间纤维厚度和最上层反射屏与热边界距离)对隔热性能的影响规律,为多层隔热结构的优化设计提供相关参考。

**关键词:** 热防护系统; 多层隔热结构; 参数优化; 重复使用飞行器

**中图分类号:** V475 **文献标识码:** A

**Abstract:** The combined radiation and conduction heat transfer in multilayer insulation (MLI) of reusable launch vehicle was investigated by the finite element method to simulate reentry aerodynamic heating conditions. The temperature field in MLI was presented. The effects of the design parameters such as foil arrangement, foil spacing and the distance from the top foil to the heat boundary were analyzed to give an instruction for MLI optimum design.

**Key words:** thermal protection system; multilayer insulation; parameter optimization; reusable launch vehicle

未来空天飞行器的空间往返能力大大增强,它们在飞行过程中将承受着温差变化的巨大影响,从而在其表面上产生较大的温度梯度和热流密度,对飞行器的安全飞行直接构成威胁。为了保证飞行器主体结构及内部仪器设备的安全,必须采用隔热措施对它们进行保护。

多层隔热结构(MLI)因具备质量轻且隔热效果较好的特点而被广泛应用到空天飞行器中,它是由一定数量的反射屏及屏间的隔热纤维组成的,利用反射屏的高反射率提供较大的热阻,从而阻止隔热层内的纵向辐射传热。由于目前所用的隔热材料多为可承受高温的低密度隔热纤维,这种材料具有较大的热传导率,因此在高温情况下多层隔热结构内部辐射传热处于主导地位,而在低温情况时纤维的传导传热则起主要作用。考虑到这些因素,可通过对反射屏位置分布及屏间纤维厚度等因素的优化设计,使多层隔热结构在质量及隔热性能方面达到最佳效果。

在多层隔热结构的理论分析及实验研究方面国内外均做了大量的研究<sup>[1-3]</sup>,但综合已发表的文献,在如何优化多层隔热结构以保证隔热结构性能

最优方面,均未有明确的结论。Darybeigi<sup>[4]</sup>以单位面积质量为比较参量,通过实验设计的方式对隔热结构进行优化,认为当反射屏位置靠近热边界时隔热性能较好;而马忠辉<sup>[5]</sup>对具有单反射屏的隔热结构进行分析后,则认为当反射屏位置布置在接近结构尺寸 1/10 处时隔热性能最佳。

本文以 4 层反射屏隔热结构为研究对象,利用有限元方法对再入环境下多层隔热结构进行一维传热分析,以反射屏位置、反射屏与热边界距离和屏间间隔等因素为变量,通过不同情况下多层隔热结构的隔热性能比较,得到隔热性能最佳时多层隔热结构内反射屏的合理位置,为多层隔热结构的优化设计提供参考。

### 1 多层隔热结构传热机理分析

再入过程中热防护结构经受着巨大的气动加热,从而产生较大的热流梯度和压强梯度,热量由外向内传递,在平面范围内温度变化不大,因此可简化为无热源一维非稳态复合传热。多层隔热结构内存在多种传热模式:层间纤维固体导热、反射屏之间及纤维内部的辐射传热、层间气体导热及多孔介质内部可能的对流传热(取决于重力和热流加载的方向)。当介质密度一定时,气流被细分到各孔径中,内部的自然对流非常小,因此研究中

忽略自然对流换热影响,其温度场的微分控制方程及边界条件为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial q_r}{\partial x} \quad (1)$$

初始条件为

$$T(x, 0) = T_0 \quad (2)$$

边界条件为

$$\left. \begin{aligned} T(0, t) &= T_r(t) \\ T(L, t) &= T_L(t) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中:  $\rho$  和  $c$  分别为包括反射屏与隔热材料的总密度及总比热;  $T_r(t)$  为飞行器辐射平衡温度;  $q_r$  为辐射热流;  $L$  为隔热结构厚度;  $k$  为考虑气体和固体传导的当量热传导系数, 为固体传导系数  $k_s$  和气体传导系数  $k_g$  的函数, 一般采用热阻模型和几何模型进行求解。考虑到隔热纤维相关参数的限制, 本文采用并行热阻计算模型<sup>[6]</sup>

$$k = f k_s + (1 - f) k_g \quad (4)$$

式中:  $f$  为材料多孔率。

利用有限元法(FEM), 将热防护结构离散为多个元素, 沿热流传递的一维单向坐标方向进行单元划分, 通过对每一元素的变分求解, 联立整个求解域, 得出单元或节点的温度值。根据微分方程和边界条件得到相应的泛函<sup>[7]</sup>为

$$I = \sum_{i=e}^E I^{(e)} = \sum_{i=e}^E \left\{ \frac{1}{2} \int_{\Omega} \left[ k \left( \frac{\partial T^{(e)}}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial q_r}{\partial x} + \rho c \frac{\partial T^{(e)}}{\partial t} \right) T \right] d\Omega \right\} \quad (5)$$

设元素温度表示为

$$T^{(e)}(x) = [N(x)] \vec{T}^{(e)} \quad (6)$$

式中:  $\vec{T}^{(e)}$  为节点温度。

令

$$\frac{\partial I}{\partial T_i} = \sum_{e=1}^E \frac{\partial I^{(e)}}{\partial T_i} = 0$$

其中:  $T_i$  为待定温度值, 经过推导后即可得

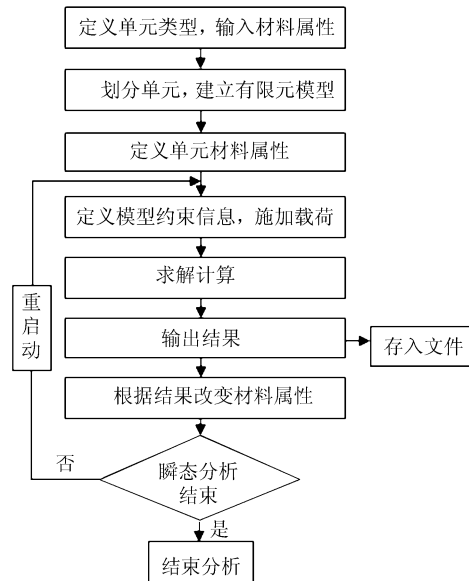
$$\frac{\partial I^{(e)}}{\partial T_i} = \int_{\Omega} \left\{ \left[ k \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} \right] \vec{T}^{(e)} + N_i \frac{\partial q_r}{\partial x} + \rho c N_i N_j \vec{T}^{(e)} \right\} d\Omega \quad (7)$$

由于隔热结构层内纤维材料多为吸收、发射和散射介质, 内部存在辐射能量的吸收和散射, 内部辐射传热方程中具有较多控制参数, 因此可根据纤维材料的光学厚度划分成多种辐射状态, 并相应地应用扩散、光学薄和二流近似等方法对内部辐射传热方程进行简化处理求得近似辐射热流值<sup>[8]</sup>。其中光学厚度  $\tau_0$  等于介质特征尺寸  $L'$  与光子平均自由程  $\lambda_p$  之比, 是纤维厚度  $L$ 、纤维密

度  $\rho$  和比衰减系数  $e$  的乘积, 即

$$\tau_0 = \frac{L'}{\lambda_p} = e \cdot \rho \cdot L \quad (8)$$

本文采用有限元分析软件 ANSYS 对多层隔热结构进行传热分析, 建立一维有限元瞬态传热模型。分别选用热传导杆单元 LINK33 和二节点热辐射杆单元 LINK31 模拟盖板、隔热层内的传导和反射屏与上下盖板之间及反射屏之间的辐射。由于材料的热性能为温度和压力等一系列参数的函数, 需要在每一时间步长分析时交换相应的数据。本文充分利用 ANSYS 参数化 APDL 语言的计算控制和结果提取功能以及循环迭代算法, 编制批处理命令流文件, 采用重启动分析, 实现材料属性的实时改变。主要分析流程及部分主要命令流如图 1 所示。



```

.....
/SOLU
RESCONTROL,,ALL,ALL
BFUNIF,TEMP,294
D,1,TEMP,REQTEM(TM0)
TIME,TM0
SOLVE
RESCONTROL,FILE_SUMMARY
.....
* DO, TM, TM1, TM_INCR
/SOLU
ANTYPE,,REST
.....
DDELE,1,TEMP
D,1,TEMP,REQTEM(TM)
TIME,TM
SOLVE
/POST1
.....
* END DO
    
```

图 1 有限元传热分析流程及部分主要命令流

Fig. 1 Analytic flow chat and part of the main command lines

为验证计算方法的正确性,将有限元分析结果与文献[4]实验结果进行比较,分析过程中各参数和边界条件的选取均遵循实验值,图2给出有限元计算结果与实验数据及文献数值计算结果的比较曲线。由曲线值可以看出,有限元素法计算结果与实验数据吻合较好,两者间最大误差为4.2%,在允许误差范围内,可用于后续多层隔热结构的分析设计中。

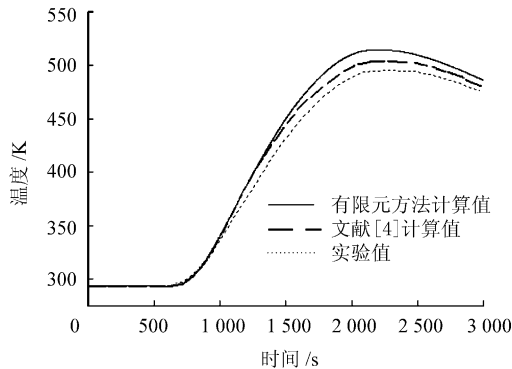


图2 计算结果比较

Fig. 2 Comparisons between FEM results and experiment data

## 2 多层隔热结构优化设计

对于理想状态的多层隔热结构,其隔热效果与反射屏的辐射率 $\epsilon$ 及反射屏的层数有关。假定两灰体平面温度分别为 $T_1, T_2$ ,中间置有 $n$ 层反射屏,且反射屏与平面辐射率相同,则平面间辐射换热量为

$$q = \frac{\sigma A (T_1^4 - T_2^4)}{(n+1)[(2/\epsilon) - 1]} \quad (9)$$

可见,辐射率一定时,反射屏层数增加能减少平面间的辐射传热, $n$ 层反射屏可使换热量减少到 $1/(n+1)$ 。但在实际中多层隔热结构的隔热效果不仅与反射屏的辐射率 $\epsilon$ 及反射屏的层数有关,还受到屏间纤维传热的影响,因此不能简单地靠增加反射屏层数,提高反射屏辐射率来实现隔热性能的提高,需要对其进行综合分析,获得不同参数与隔热结构性能的变化规律。

基于上述原理,以4层反射屏结构为例,通过对反射屏位置和屏间纤维厚度等多个参数的分析,获得参数与隔热性能之间的相关变化规律,得到隔热性能最佳时反射屏的合理布置。分析过程中保持多层隔热结构总厚度76.2 mm不变(模拟典型金属热防护系统<sup>[9]</sup>),屏间多晶氧化铝纤维密度固定为 $24 \text{ kg/m}^3$ ,反射屏反射率恒为0.1,镍板与铝合金板分别模拟多层隔热结构外部热边界及

飞行器结构面,常温面板模拟飞行器内部常温环境。由于隔热结构主要作用在于确保飞行器主体结构在允许的温度范围内,飞行器表面结构的温度响应最终决定进入飞行器内部的总热量,因此重点考虑飞行器表面结构即铝合金板的温度变化,利用有限元方法模拟再入环境下多层隔热结构的瞬态传热。图3和图4分别为多层隔热结构示意图及典型再入环境飞行器表面辐射平衡温度和压力时间变化曲线<sup>[10]</sup>。

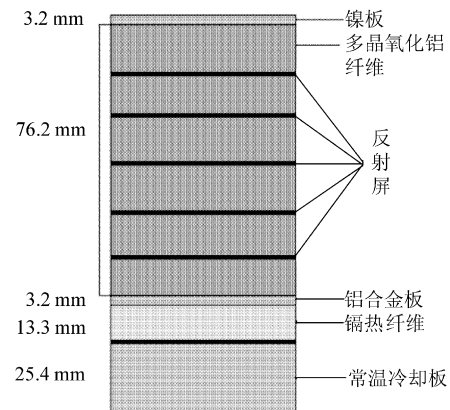


图3 多层隔热结构示意图

Fig. 3 Multilayer insulation structure schematic model

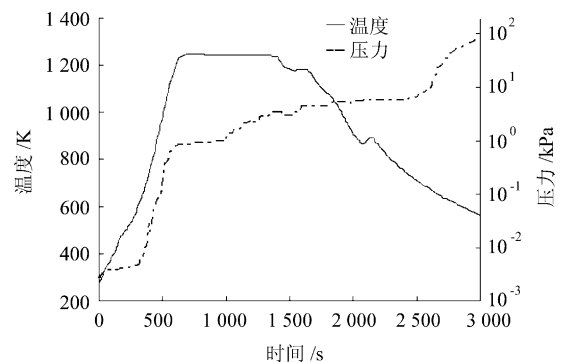


图4 再入环境温度和压力变化曲线

Fig. 4 Typical reentry radiation equilibrium temperature and pressure curves

### 2.1 反射屏不同分布位置对多层隔热结构瞬态温度响应的影响

由于多层隔热结构内部涉及到辐射换热与介质固体气体导热的复合传热问题,因此在多层隔热结构内部不同位置放置相同数目的反射屏必然会得到相异的隔热效果。为获得不同反射屏分布情况下多层隔热结构隔热性能的变化,假定屏间间隔一定(3 mm),令反射屏在隔热结构内部不同位置按照一定规律进行分布,分析反射屏位置的

改变对隔热结构内部传热和隔热性能的影响：  
①反射屏聚集在热边界，最上层反射屏与热边界距离等同于屏间间隔距离；②反射屏聚集在冷边界，最下层反射屏与冷边界距离等同于屏间间隔距离；③反射屏靠近两边界分布，反射屏与冷热边界距离均与屏间间隔距离一致；④反射屏聚集在中间位置，均匀分布在中线左右。图5和表1分别为不同情况下，铝合金板的温度响应曲线及温度极值和极值出现时间。

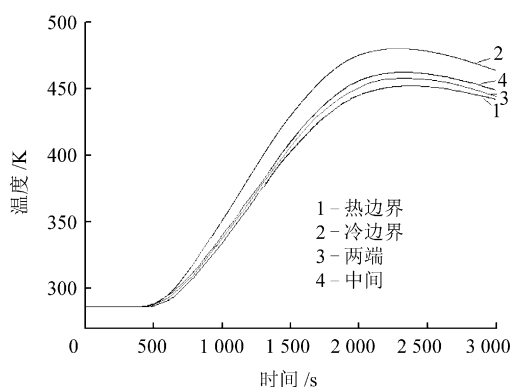


图5 不同反射屏分布情况下铝合金板温度响应曲线

Fig. 5 Aluminum panel temperature response curves for different foil distributions

表1 不同反射屏分布情况下铝合金板温度响应极值及对应时间

Table 1 Aluminum panel peak temperatures and relevant times for different foil distributions

反射屏分布情况	热边界	冷边界	两端	中间
温度响应极值/K	452.29	480.46	458.57	462.55
极值出现时间/s	2 377	2 274	2 349	2 325

从结果可看出，4种分布情况下铝合金板温度响应曲线大致相似，但吸热时间和极值温度却有较大差异。相比而言，反射屏靠近冷边界时效果最差，中间分布和两端分布次之，靠近热边界时隔热效果最佳，此时所对应的内部结构峰值温度最低，吸热时间最长，高温持续时间也最短。

由于反射屏的主要作用是利用自身的高反射率为隔热层内的辐射传热提供大的热阻，而靠近热边界处辐射为主要传热方式，因此将反射屏布置在此区域，可将大部分热量阻挡在隔热结构上端，从而有效地降低了隔热结构的吸热量，延缓了铝合金板温度的上升时间；而冷边界和中间位置处温度较低，主要传热方式为纤维传导，因此反射屏阻热效果不大。对于两端分布虽然阻挡了一部分热量的进入，但与热边界分布比较，仍使相对较

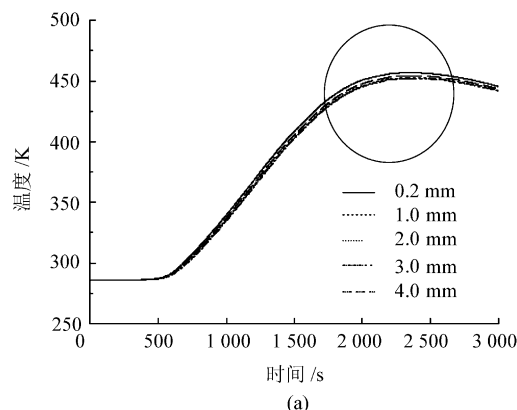
多的热量进入隔热结构。因此在多层结构设计时，应尽量在热边界布置反射屏，最大限度地利用反射屏的热阻效用。

## 2.2 反射屏与热边界距离及屏间纤维厚度变化对多层隔热结构瞬态温度响应的影响

为得到靠近热边界时4层反射屏隔热结构的最佳设计，采用渐进式分析，在热边界分布基础上以上层反射屏与热边界的距离 $s$ 和屏间的纤维厚度 $d$ 为循环变量，逐次求出隔热性能最佳时的 $s$ 值和 $d$ 值，获得两参数与隔热结构隔热性能的相关变化规律，为实际多层隔热结构设计提供一定参考。

### (1) 反射屏与热边界距离变化对多层隔热结构瞬态稳态温度响应的影响

固定屏间纤维厚度为3 mm，逐渐改变反射屏与热边界距离 $s$ ，寻找其变化规律。考虑到反射屏靠近热边界分布前提， $s$ 值分别选取为0.2, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 mm。图6给出不同情况下铝合金板的温度响应曲线及其局部放大图。从图中可以发现，随着 $s$ 的增大，铝合金板整体温度降低，但降低幅值随着与热边界距离的增加而减小。当反射屏与上边界距离为0.2 mm时，隔热效果最差。这时虽然反射屏绝对温度很高，但由于和上边界温差很小，两者辐射换热较少，导致反射屏作用减弱。随着反射屏与热边界距离的增加，使得由热边界进入隔热结构的热量增多，增大了热边界与上层反射屏的温度差，使热边界与上层反射屏间的辐射换热热流增大。但当反射屏与上边界距离达到3.0 mm时，温度再无明显变化趋势，其中 $s=3.0$  mm和 $s=4.0$  mm时铝合金板温度最大差值仅为0.3 K。因此在设计上端反射屏与热边界距离时，可按照变化规律选取 $s=3.0$  mm。



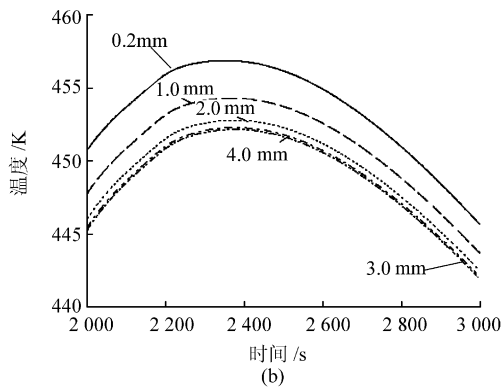


图 6 不同  $s$  值对应铝合金面板温度响应曲线(a)及局部放大图(b)

Fig. 6 Aluminum panel temperatures response curves (a) and part enlarge profiles for different  $s$  values (b)

(2) 屏间纤维厚度变化对多层隔热结构瞬态稳态温度响应影响

当屏间纤维较薄时,反射屏间的换热近似于理想状态辐射换热规律,只受反射屏温度、辐射率的影响,对反射屏间的纤维厚度不敏感。但随着屏间纤维厚度的增大,必须考虑纤维厚度对反射屏辐射换热影响。由于在反射屏均分情况下屏间纤维厚度为 15.2 mm,故在分析时固定上层反射屏与热边界距离为 3 mm,逐渐改变屏间纤维厚度  $d$  使其按 3, 6, 9, 12, 15 mm 规律逐次变化,寻求屏间纤维厚度对隔热性能的影响规律。图 7 为不同纤维厚度与铝合金结构温度响应的对应曲线。

由图 7 可以看出,不同纤维厚度铝合金板温度响应趋势大致相同,随着  $d$  的增加,温度升高时间有明显滞后趋势。表 2 为内部结构温度响应值达到 300 K 时,不同  $d$  值所对应的时刻。由表 2 可以看出, $d$  值越小,达到相同温度所用时间越短,温度升高越快。但当纤维增至一定厚度时,随着时间变化,不同纤维厚度对应的温度响应曲线出现交叉现象。例如:当  $d=15$  mm 时,虽然温度

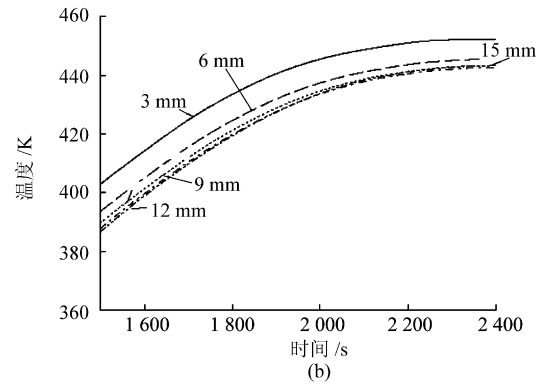
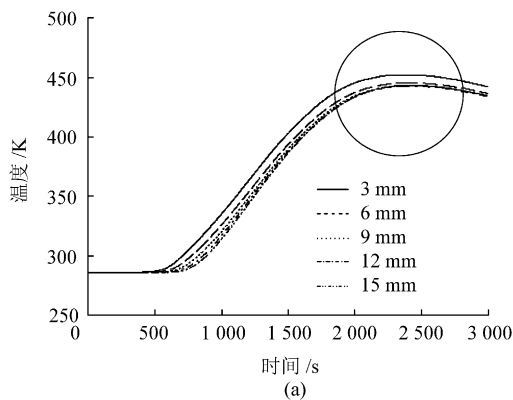


图 7 不同纤维厚度对应铝合金面板温度曲线(a)及局部放大图(b)

Fig. 7 Aluminum panel temperature curves (a) and part enlarge profiles for different foil spacings (b)

起升较晚,1 939 s 前温度值均小于同时刻下  $d=12$  mm 所对应温度值,但之后温度上升较快,超出同时刻  $d=12$  mm 所对应值。这是由于再入前段,多层结构整体处于吸热期,屏间纤维厚度越大,纤维吸收热量越多,滞留在隔热结构内的热量也越大;但再入后期,多层结构温度达到最高,向内部结构放热,使内部结构温度迅速上升。为阻止内部结构温度的升高,须保证反射屏与冷边界之间的纤维具有较大厚度。

表 2 铝合金板达到 300 K 时不同屏间纤维厚度值对应时间

Table 2 Relevant times of aluminum panel temperature at 300 K for different foil spacings

$d$ /mm	3	6	9	12	15
时间/s	708	775	826	861	881

表 3 为不同纤维厚度下铝合金结构峰值温度及其时间。通过比较可知,随着屏间纤维厚度的增大,铝合金板温度逐渐减小,屏间纤维越厚,温度上升时间越晚,但再入过程后期纤维层向内部结构放热也越多。综合考虑峰值温度和峰值时间,当纤维厚度为 12 mm 时,隔热效果最好。

表 3 不同纤维厚度下铝合金结构峰值温度及其时间  
Table 3 Aluminum panel peak temperatures and relevant times for different foil spacings

屏间纤维厚度/mm	3	6	9	12	15
峰值温度/K	452.29	455.48	443.32	442.67	443.34
峰值时间/s	2 377	2 410	2 416	2 418	2 420

### 3 结 论

采用有限元方法对可重复使用飞行器多层隔

热结构进行参数化求解,模拟再入条件下多层隔热结构内部辐射和传导复合换热,通过再入条件下具有 4 层反射屏的多层隔热结构瞬态温度响应求解,对影响隔热性能的多个因素(如反射屏的分布、屏间纤维厚度和最上层反射屏与热边界距离)进行分析,优化多层隔热结构设计,使隔热结构具有相对较好的隔热性能。分析发现,在多层隔热结构质量一定时,若反射屏靠近热边界布置,且上层反射屏与热边界距离 3 mm,屏间纤维厚度为 12 mm 时隔热效果最佳。

### 参 考 文 献

- [1] Stauffer T. The effective thermal conductivity of multi foil insulation as a function of temperature and pressure[R]. AIAA 1992-2939, 1992.
- [2] Spinnler M, Winter E R F, Viskanta R, et al. Theoretical studies of high-temperature multilayer thermal insulation using radiation scaling[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2004, 84: 477-491.
- [3] Krishnaprakas C K, Narayana K B, Dutta P. Heat transfer correlations for multilayer insulation systems [J]. *Cryogenics*, 2000, 40: 431-435.
- [4] Daryabeigi K. Thermal analysis and design of multi-layer insulation for reentry aerodynamic heating [R]. AIAA 2001-2834, 2001.
- [5] 马忠辉. 可重复使用运载器热防护系统性能分析研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2004.
- Ma Zhonghui. Reusable launch vehicle thermal protection system performance study [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2004.
- [6] Crittenden P E, Cole K D. Design of experiments for thermal characterization of metallic foam[R]. AIAA 2004-2170, 2004.
- [7] Rao S S. The finite element method in engineering [M]. Oxford: Pergamon Press, 1989.
- [8] E M 斯帕罗, R D 塞斯. 辐射传热[M]. 北京: 高等教育出版社, 1983.
- Sparrow E M, Cess R D. Radiative transfer [M]. Beijing: Higher Education Press, 1983.
- [9] Dorsey J T, Chen R R, Poteet C C. Metallic thermal protection system technology development: concepts, requirements and assessment overview [R]. AIAA 2002-0502, 2002.
- [10] Daryabeigi K. Design of high temperature multilayer insulation [D]. Charlottesville: University of Virginia, 2000.

### 作者简介:



赵玲(1982—) 女, 硕士, 助工。主要研究方向: 环境模拟与控制。

E-mail: zhaoling\_zlg@163.com

(责任编辑: 李铁柏)