

文章编号: 1000-8055(2006)05-0800-05

金属热防护系统多层隔热材料的 稳态传热分析

闫长海, 孟松鹤, 陈贵清, 曲 伟, 刘国仟
(哈尔滨工业大学 复合材料与结构研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 采用能量平衡方程和两热流密度近似法建立了金属热防护系统多层隔热材料的稳态传热的数学模型, 并利用测量多层隔热材料单元的有效导热系数的实验和遗传算法对纤维隔热材料的辐射衰减系数和隔热屏表面辐射发射系数这两个热物参数进行了优化, 最后用实验测得的多层隔热材料的有效导热系数验证了采用优化后参数的多层隔热材料的稳态传热模型的正确性。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 金属热防护系统; 稳态传热; 多层隔热材料; 遗传算法; 优化
中图分类号: V231. 1 **文献标识码:** A

Steady heat transfer analysis of multilayer thermal insulations for metallic thermal protection system

YAN Chang-hai, MENG Song-he, CHEN Gui-qing,
QU Wei, LIU Guo-qian

(Research Center of Composite Materials,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Combined energy equilibrium equation and two thermal flux approximation methods were used to establish the steady heat transfer mathematic model of the multi-layer thermal insulations in the metallic protection system. Radiation attenuation index of fibrous thermal insulations and emissivity of heat insulation screen were optimized by genetic algorithm and experiment that measured the effective conductivity of the multilayer thermal insulation element. The experimentally measured effective conductivity data of the multi-layer thermal insulations validate steady heat transfer model of the multi-layer thermal insulations, which adopt optimized thermal physical parameters.

Key words: aerospace propulsion system; metallic thermal protection system;
steady heat transfer; multilayer thermal insulation

目前可重复使用航天器是各国下一代航天器
开发的重点, 多种可重复使用热防护系统被设计

开发出来, 其中金属热防护系统的研究和发展都
很快并显示出很强的竞争力, 使之很有希望应用

收稿日期: 2005 - 08 - 30; 修订日期: 2005 - 12 - 18

基金项目: 国家自然科学基金资助(90405016; 90205034)

作者简介: 闫长海(1972 -), 男, 辽宁大连人, 哈尔滨工业大学复合材料与结构研究所博士生, 主要从事航天器热防护系统的研究。

到下一代可重复使用航天器上^[1]。以 X-33 金属热防护系统为例^[2],金属热防护系统是由表面的高温合金蜂窝盖板、隔热材料和内部钛合金蜂窝板三层结构组成。表面为高温合金蜂窝盖板,用于抵挡在发射和飞行中外来物体的撞击。在飞行器重返大气时,表面盖板由于受到严重的气动加热,温度最高达 1 000 °C,而由于机身是铝合金制成的,最高设计温度为 176 °C^[3],中间隔热材料的作用就是减少进入机体内的热量。在 X-33 改进的“ARMOR”^[4]金属热防护系统的设计过程中,中间的隔热材料采用纤维隔热材料,目前美国、欧洲和日本的可重复使用航天器的验证机都采用隔热效果更好,重量更轻的多层隔热材料(如图 1)。可见要想设计出隔热性能更好,重量更轻的金属热防护系统,对多层隔热材料的稳态传热过程进行准确的分析是金属热防护系统进行防热设计的基础。

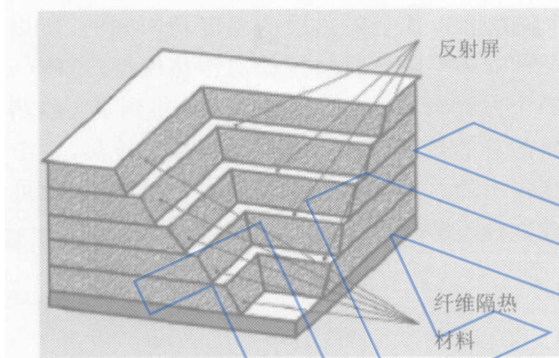


图 1 多层隔热材料的示意图

Fig. 1 Multilayer thermal insulation

多层隔热材料是由纤维隔热材料与隔热屏组成的。当温度大于 800 °C 时,热辐射是纤维隔热材料内的主导传热方式,隔热屏的作用是降低高温情况下热辐射在纤维隔热材料内的传递。国外已对多层隔热材料的传热进行了研究, Kamran^[5]采用两热流密度方法对多层隔热材料建立了传热模型, Markur Spinnler^[6,7]采用 scaling 模型对辐射传热进行求解。但是他们只是建立了传热模型,并没有对传热模型所用到的参数进行优化,而且认为隔热屏的表面辐射发射系数是常数,但是隔热屏的辐射系数实际是随温度的升高而增加的,所以得到隔热屏的辐射系数随温度变化的函数对于多层隔热材料传热模型的准确性是很重要的。由于两热流密度法精度较高,所以本文采用能量方程和两热流密度法建立了多层隔热材料传热的数学模型,并利用稳态传热实验与遗传算

法对传热模型参数进行优化。

1 计算模型

要建立多层隔热材料传热的数学模型就要了解其工作环境。飞船在再入过程中,主要的加热时间为再入后 200~1 500 s 这一区间,这时外界压力的变化为 $10^3 \sim 10^4$ Pa,温度在 1 000 °C。Kamran^[5]通过实验发现,当外界压力大于 10^3 Pa,纤维隔热材料的导热系数随压力的变化很小,所以为了简化计算,设工作压力为 10^3 Pa,温度为 1 000 °C。在这种条件下,多层隔热材料内的热传递是由气体和固体的热传导和热辐射组成,气体的对流可以忽略不计^[3],如公式(1):

$$q = q_c + q_r \quad (1)$$

式中: q 为再入过程中多层隔热材料内总的热流密度; q_c 为固体和气体的热传导的热流密度; q_r 为多层隔热材料内热辐射的热流密度。

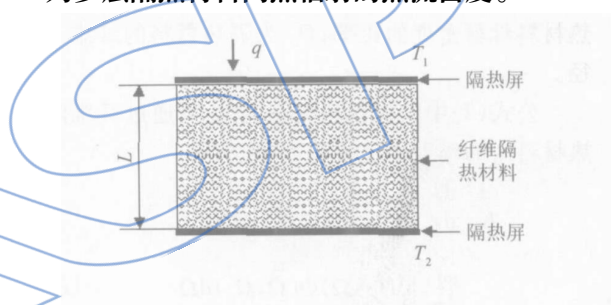


图 2 多层隔热材料单元传热示意图

Fig. 2 Heat transfer of cell of multilayer insulation

多层隔热材料是由隔热屏和纤维隔热材料堆栈而成,每个单元内的传热方式是相同的,所以取出一个单元来建立多层隔热材料传热模型如图 2。由于纤维隔热材料内的传热为热传导和热辐射联合热传递问题,所以要想建立稳态传热模型,就要从能量平衡方程和辐射传递方程出发,利用边界条件对传热模型进行求解。多层隔热材料的稳态传热模型的能量方程可用公式(2)表示:

$$\frac{\partial q_c}{\partial x} + \frac{\partial q_r}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

把傅立叶公式带入公式(2)可得到下式:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_c \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial q_r}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

式中, k_c 是纤维隔热材料固体和气体的导热系数,它是温度的函数。它是由气体导热系数和固体导热系数并联而成的如公式(4):

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

式中, f 为纤维隔热材料的空隙率; k_s 纤维材料的固体导热系数; 纤维隔热材料是由二氧化硅纤维制成, 所以 k_s 为固体二氧化硅的导热系数, k_g 为气体的导热系数, 采用下式^[4]:

$$k_g = \frac{k_g^*}{1 + 8 \frac{\lambda_m}{(\gamma + 1) Pr L_c}} \quad (5)$$

式中, k_g^* 为一个大气压下常温的气体导热系数; γ 为气体比热比; Pr 为普朗特数; 气体分子的平均自由程 λ_m 由公式(6)给出:

$$\lambda_m = \frac{K_B T}{\sqrt{2} \pi d_g^2 P} \quad (6)$$

式中, K_B 为玻尔兹曼常数 (1.38×10^{-23} J/K), T 和 P 分别为气体的温度和压力, d_g 为气体的碰撞直径。公式(5)中 L_c 为纤维隔热材料中的气体热传导的特征长度, 可用下式表示:

$$L_c = \frac{\pi D_f}{4m} \quad (7)$$

式中: m 为固体致密度, 它是隔热材料的密度和隔热材料母材密度的比率; D_f 为隔热材料的纤维直径。

公式(3)中的辐射热流密度 q_r 可通过纤维隔热材料内的辐射传递方程(8)来求解:

$$\frac{1}{K_e} \frac{dI}{ds} + I(s) = (1 - \omega) I_b(s) + \frac{\omega}{4\pi} \int_{4\pi} I(s, \Omega) \Phi(\Omega, \Omega') d\Omega \quad (8)$$

式中, I 为辐射强度, K_e 为辐射衰减系数, ρ 为纤维隔热材料的密度, ω 为反照率, 也可被称为散射度, 对于纤维隔热材料, 一般取 0.99。 $\Phi(\Omega, \Omega')$ 为相函数, 稳态的边界条件用下式表示:

$$T(0) = T_1, \quad T(L) = T_2 \quad (9)$$

辐射传递方程是微分-积分方程, 求解主要有光学薄近似法、光学厚近似法和指数核近似法等方法, 针对目前的热模型, 采用两热流密度法^[8]对以上热模型是比较合适的, 假设隔热材料为灰体, 辐射热流密度可由下式表示:

$$\frac{\partial q_r}{\partial x} = K_e \rho (1 - \omega) (4\sigma T^4 - G) \quad (10)$$

式中, G 为随机辐射函数, 它可通过下面的微分方程(11)进行求解:

$$-\frac{1}{3(K_e \rho)(1 - \omega)} \frac{\partial^2 G}{\partial x^2} + G = 4\sigma T^4 \quad (11)$$

上下隔热屏处为微分方程的边界, 它边界条件如下:

$$-\frac{2}{3(K_e \rho) \left(\frac{\epsilon}{2 - \epsilon_1} \right)} \frac{\partial G}{\partial x} + G = 4\sigma T_1^4$$

$$x = 0$$

$$-\frac{2}{3(K_e \rho) \left(\frac{\epsilon}{2 - \epsilon_2} \right)} \frac{\partial G}{\partial x} + G = 4\sigma T_2^4$$

$$x = L$$

$$(12)$$

式中: ϵ_1 和 ϵ_2 为隔热屏上下表面的辐射发射系数。

公式(1)~(12)给出了能量平衡方程, 随温度压力变化的纤维隔热材料的导热系数的求解方程和辐射热流密度的求解方程。这样就完成了多层隔热材料的单元建模任务, 通过以上方程可以得出单元内总的热流密度 q , 这里需要指出的是, 得到总热流密度 q 的前提是上下隔热屏的温度是已知的, 但是在实际的多层隔热材料的稳态传热过程中只有第一层和最 n 层的温度已知的 (假设有 n 个隔热屏), 其余隔热层的温度是未知的, 所以要想建立多层隔热材料的稳态传热模型, 还需 $(n - 2)$ 个方程来和以上方程联立才能得到多层隔热材料的总的热流密度 q 。由于是稳态传热, 各个单元得出的总热流密度是相同的, 这样我们就可以建立 $(n - 2)$ 个方程:

$$\begin{cases} q_1 = q \\ q_2 = q \\ \dots \\ q_{n-3} = q_{n-2} \\ q_{n-2} = q_{n-1} \end{cases} \quad (13)$$

式中: q_n 为第 n 个隔热屏和第 $(n + 1)$ 个隔热屏之间单元的总热流密度。通过加入方程(13), 纤维隔热材料的一维稳态传热模型被建立。

多层隔热材料稳态传热分析涉及对能量平衡方程(3)和(9)和辐射热流密度方程(11)和(12)这两个微分方程进行求解。本文采用有限差分的方法这两个微分方程进行离散, 整个分析过程采用统一的离散单元。这样在已知单元上下表面温度的条件下可以得到单元内的总热流密度; 在已知多层纤维隔热材料上下表面的温度的情况下, 和方程(13)联合求解可以得到多层隔热材料内的温度分布, 最终求出多层隔热材料总的热流密度。

2 参数的优化

在多层隔热材料的稳态传热模型中, 纤维隔

热材料的辐射衰减系数 K_e 和隔热屏表面的辐射发射系数 ε 这 2 个参数是作为已知条件的,但是针对本文所使用的纤维隔热材料和 haynes214 高温合金无法得到其准确数值,而且这两个参数是温度的函数,其数值随升高而增加,所以本文采用实验和遗传算法相结合的办法来对这两个参数进行优化。

实验要测试多层隔热材料单元在压力为 10^3 Pa 下,温度在 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 °C 和 1 000 °C 温度下的有效导热系数。稳态热测试实验设备如图 3 所示。

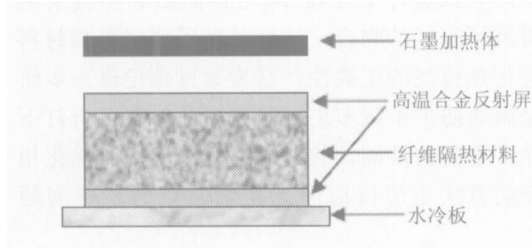


图3 稳态实验设备示意图

Fig.3 Graph of steady heat transfer apparatus

最上面为石墨加热体,最高可加热的温度为 1 400 K,被测试的纤维隔热材料上、下面放置高温合金(haynes214)制成的隔热屏,下面放置的隔热屏和水冷板相连,所以下面隔热屏的温度恒定为 30 °C,而上面隔热屏的温度则是测试温度,试样的纤维隔热材料的密度分别为 96, 128 和 160 kg/m^3 ,厚度为 75 mm。每个温度测量 3 次取平均值,测试结果如图 4 所示。

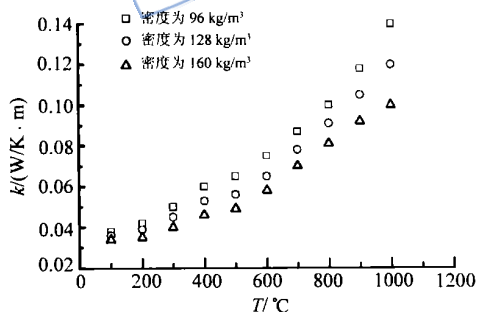


图4 有效导热系数测量值

Fig.4 Measuring value of effective conductivity

在得到了多层隔热材料单元在不同温度条件下的实验数据后,把这些实验数据代入多层隔热材料单元的传热模型并利用遗传算法对纤维隔热材料的辐射衰减系数 K_e 和隔热屏表面的辐射发射系数 ε 进行优化估算。由于辐射衰减系数是温

度的一次函数,所以可用下式表示:

$$K_e = a_1 + a_2 T \quad (14)$$

而隔热屏表面的辐射发射系数 ε 可利用下式表示:

$$\varepsilon = a_3 T^{a_4} \quad (15)$$

遗传算法是一种优化搜索算法,其优化原理是在使理论计算与实际测得的有效导热系数误差最小的情况来反推得到纤维隔热材料的辐射衰减系数和隔热屏表面的辐射发射系数。根据本文的问题,其遗传算法的步骤如下:

(1) 初始化参数 a_1, a_2, a_3 和 a_4 种群的个数取 40,长度取 45。 K_e 的值域为 1~100, ε 的取值范围为 0~1。

(2) 把这 4 个参数变换为十进制数代入公式 (14) 和 (15)。

(3) 把 (2) 中得到的函数带入多层隔热材料单元的传热模型中,最后可得到多层隔热材料单元的有效热传导系数 k ,将不同的温度条件下实验测得的 k 值与计算值 K 按下式进行计算:

$$S = \sum_{i=1}^N [k(i) - K(i, a_1, a_2, a_3, a_4)]^2 \quad (16)$$

式中: K 为有效热传导率的计算值; k 为有效导热系数的实验值; S 为目标函数, N 个不同温度下的计算值与实验值差的平方和;这里取 30,为 100~1 000 °C 这 3 种不同密度的隔热材料的有效导热系数值。

(4) 基因任意排列,按目标函数适应度 (S 值越小适应度越高) 的大小将染色体分成两半,一半适应度高的和一半适应度低的。将低的一组淘汰

(5) 前一半适应度高的染色体中的基因交叉配对,后一半适应度低的基因交叉配对,然后组成一组新的染色体。

(6) 对新的染色体按概率 0.08 进行变异。检查目标函数是否小于 0.05,若小于则输出参数 a_1, a_2, a_3 和 a_4 。否则,重复步骤 (2)~(5)。直至求出最优的 a_1, a_2, a_3 和 a_4 。

最终得到的优化结果见公式 (17):

$$K_e = 55.34 + 0.019 T$$

$$\varepsilon = 5.43 \times 10^{-4} T^{0.651} \quad (17)$$

3 多层隔热材料的有效导热系数的测试

在得到优化后的纤维隔热材料的辐射衰减系

数 K_e 和隔热屏的表面辐射发射系数 ε 后,把它们代入多层隔热材料的稳态传热模型,来预测多层隔热材料的有效导热系数。为了验证多层隔热材料的稳态传热模型,本文采用图 3 的实验设备测试了多层隔热材料的有效导热系数。被测试的多层隔热材料长、宽均为 450 mm,它是由 4 层隔热屏和 3 层纤维隔热材料组成的,2 个隔热屏之间的纤维隔热材料的密度为 96 kg/m^3 ,厚度为 25 mm,总厚度为 75 mm。测试条件如下:压力为 10^3 Pa ,上表面温度分别是 100,200,300,400,500,600,700,800,900 $^\circ\text{C}$ 和 1000 $^\circ\text{C}$,下表面温度均为 30 $^\circ\text{C}$,所有测试均在氮气保护下进行。每个温度测试 5 次。测试后通过误差分析发现,温度越高,标准偏差越大,温度 100 $^\circ\text{C}$ 时有效导热系数的相对标准偏差为 0.076,而 1000 $^\circ\text{C}$ 情况下的相对标准偏差为 0.136,可见温度越高,测量的精度越差。实验平均值与预测值的比较见图 5。

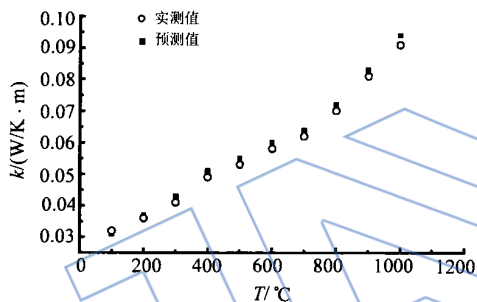


图 5 多层隔热材料有效导热系数的预测值和实测值的比较

Fig. 5 Comparison between forecasting value and measuring value of effective conductivity

通过实测值和预测值的比较发现,理论预测值高于实验实测值,而且它们之间的差异随着温度的升高而加大,最大的差异为 7%。可见理论和实验得到了较好的吻合,从而验证了多层隔热材料传热模型的正确性。

4 结 论

本文通过采用能量平衡方程,使用两热流密度法来近似求解辐射传递方程建立了多层隔热材料稳态传热的数学模型,并利用实验和遗传算法

对纤维隔热材料的辐射衰减系数和 haynes214 高温合金的表面辐射发射系数这两个热物参数进行了优化,得到了纤维隔热材料辐射衰减系数随温度变化的函数为:

$$K_e = 55.34 + 0.019 T$$

Haynes214 高温合金的表面辐射发射系数随温度变化的函数为:

$$\varepsilon = 5.43 \times 10^{-4} T^{0.651}$$

把优化后的参数代入多层隔热材料稳态传热的数学模型中,得到多层隔热材料有效导热系数的理论预测值,并和实验测得多层隔热材料的有效导热系数进行了比较,理论预测值和实验实测值得到了很好的吻合。从而验证了多层隔热材料稳态传热模型的正确性。这为通过理论进一步研究金属热防护系统多层隔热材料的传热分析打下了非常重要的基础,同时这种理论、实验和优化相结合的方法也可以应用到其它领域的传热问题上。

参考文献:

- [1] Vincent Zoby E, Richard A Thompson, Kathtyn E Wurster. Aeroheating design issues for reusable launch vehicle - A perspective[R]. AIAA - 2004 - 2535.
- [2] Lockwood M K. Overview of conceptual design of early venturestar TM configurations[R]. AIAA - 2000 - 1042.
- [3] Max L Blosser. Advanced metallic thermal protection systems for reusable launch vehicles[D]. University of Virginia, 2000.
- [4] Blosser M L, Chen R R, Schmidt I H. Advanced metallic thermal protection system development [R]. AIAA - 2002 - 0504.
- [5] Kamran Daryabeigi. Effective thermal conductivity of high temperature insulations for reusable launch vehicles [R]. NASA/ TM - 1999 - 208972.
- [6] Markus Spinnler. Studies on high-temperature multilayer thermal insulations[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47: 1305-1312.
- [7] Markus Spinnler. Theoretical studies of high-temperature multilayer thermal insulations using radiation scaling[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2004, 84: 477-491.
- [8] Robert Siegel. Transient effects of radiative transfer in semitransparent materials [J]. International Journal of Engineering Science, 1998, 36: 1701-1739.