

# 多层隔热材料的热设计方法研究

李东辉 孙 创 夏新林

(哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

**文 摘** 基于多层隔热材料稳态辐射导热耦合传热提出一种多层隔热材料热设计方法, 可以根据反射屏分布规律实现多层隔热材料热设计, 给出最优反射屏数目和每层隔热材料的厚度。采用提出的热设计方法开展了热设计算例研究, 结果表明: 对按照层等温降和层等厚度规律设计的多层隔热材料, 等厚度规律设计比等温降规律设计更能降低隔热材料的总质量, 研究结果对多层隔热材料热设计研究具有一定的指导作用。

**关键词** 多层隔热材料, 热设计, 辐射, 导热, 耦合传热

## Thermal Design Method for Multilayer Thermal Insulations

Li Donghui Sun Chuang Xia Xinlin

(School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

**Abstract** In this study a thermal design method based upon steady state conduction and radiation coupled heat transfer process is presented for multilayer thermal insulations. With the presented method the optimal number of reflecting foils and the thickness of each insulation layer could be obtained when the foil distribution characteristics in the multilayer thermal insulation was defined. Case studies for multilayer insulations thermal design under specified conditions were conducted. Results showed that the multilayer insulation designed with unvaried thickness in each insulation layer had less mass than the multilayer insulation designed with unvaried temperature drop in each insulation layer. Results obtained in this study may be useful in the thermal design of high temperature multilayer insulations.

**Key words** Multilayer thermal insulations, Thermal design, Radiation, Conduction, Coupled heat transfer

### 0 引言

隔热材料通常对热辐射是半透明的<sup>[1]</sup>, 除利用遮光剂遮蔽热辐射传输外, 另外一种抑制热辐射的方法是将多个高反射率反射屏置于辐射半透明的隔热材料内, 以此形成多层隔热材料。

轻质、高温多层隔热材料是高超声速飞行器热防护的关键材料技术之一, 在美国 DAPPA Falcon 高超声速飞行器项目中<sup>[2]</sup>, 开发能够重复使用 50 次以上的高温多层隔热结构被列为验证飞行器 HTV-2、HTV-3 的关键热防护技术之一。

近年来, 一些学者针对热防护技术中的高温多层隔热结构传热特性开展了研究。Kamran<sup>[3]</sup>采用二流法数值模拟了高温多层各向同性散射纤维隔热材料的瞬态辐射导热耦合传热, 并开展了参数化设计研

究。马忠辉等<sup>[4]</sup>采用二热流方法分析了多层纤维材料反射屏层数、发射率及纤维层厚度对非加热面瞬态热响应的影响。Markus 等<sup>[5-6]</sup>采用比例近似方法对多层隔热结构稳态表观热导率进行了试验与理论研究。白丹等<sup>[7-8]</sup>采用有限差分法计算了多层纤维隔热结构瞬态传热特性。闫长海等<sup>[9]</sup>基于稳态表观当量热导率实验数据, 采用二流法和遗传算法对纤维隔热材料衰减系数和反射屏发射率进行了反演。李东辉等<sup>[10]</sup>采用蒙特卡罗方法研究了高温多层隔热结构的瞬态传热特性, 分析了反射屏数目、反射屏布局、反射屏比热容等因素对瞬态热响应的影响。虽然, 国内外学者对高温多层隔热材料传热特性开展了一定研究, 但是缺乏对多层隔热材料热设计方面的相关研究。本文针对多层隔热材料热设计, 提出一种基于稳

态辐射导热耦合传热的热设计方法,并开展了算例设计研究。

## 1 多层隔热材料热设计方法

飞行器在实际飞行过程中经历的热环境不断变化,严格来讲,其热防护结构处于一个非稳态热过程,达到稳态时,热防护结构承受的温度水平最高,所以稳态热设计是一个保守、安全的设计。此外,随着高超声速技术的发展,某些高超声速飞行器将长时间承受持续的气动加热,因此开展稳态条件下的热设计方法研究具有重要意义。

如图1所示的多层隔热材料,在稳态热设计条件下,多层隔热材料高温边界温度及低温边界温度受隔热材料和飞行器结构材料允许使用温度限制,隔热要求限定了进入飞行器的热流密度。对选定的每层隔热材料及金属反射屏,其热辐射特性及热物性参数是已知的。热设计计算目标是在上述已知参数的条件下获得隔热结构的层数(反射屏的个数)及每层隔热材料厚度,使多层隔热结构总厚度或总质量最小。

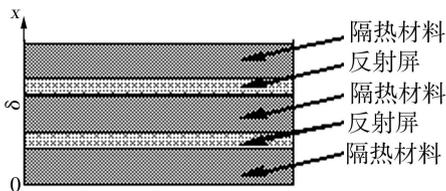


图1 多层隔热结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of multilayer thermal insulations

基于单层隔热材料稳态辐射导热耦合传热结果,对单层平板介质,沿厚度方向的一维稳态辐射导热能量方程为

$$\lambda \frac{d^2 T(x)}{dx^2} = \frac{dq_r(x)}{dx} \quad (1)$$

式中,  $\lambda$  为热导率,  $q_r$  为辐射热流密度。考虑如下给定边界温度的第一类边界条件

$$T(0) = T_{w1} \quad (2)$$

$$T(\delta) = T_{w2} \quad (3)$$

式中,  $T_{w1}$ 、 $T_{w2}$  分别为介质两个表面的温度。

将方程(1)积分两次并带入边界条件,可以得到温度分布为

$$T(x) = \left[ T_{w1} + \frac{x}{\delta} (T_{w2} - T_{w1}) \right] + \frac{x}{\lambda} [\bar{q}_r(x) - \bar{q}_r(\delta)] \quad (4)$$

式中,  $\delta$  为材料厚度。

$$\bar{q}_r(x) = \frac{1}{x} \int_0^x q_r(x'') dx'' \quad (5)$$

$$\bar{q}_r(\delta) = \frac{1}{\delta} \int_0^\delta q_r(x'') dx'' \quad (6)$$

总热流密度包括导热热流密度和辐射热流密度,可以得到

$$q^{\text{tot}} = -\frac{\lambda}{\delta} (T_{w2} - T_{w1}) + \bar{q}_r(\delta) \quad (7)$$

详细推导过程见文献[11]。

根据式(7)可以得到第  $i$  层隔热材料厚度为

$$\delta = \frac{\lambda}{\bar{q}_r(\delta_i) - q^{\text{tot}}} (T_{w1} - T_{w2}) \quad (8)$$

由于隔热材料内部温度场未知,因此辐射热流密度也是未知的,计算将是一个迭代过程。假设初始温度分布,进行辐射传输与辐射换热计算,得到辐射热流密度分布,然后按照(4)式更新隔热层温度场。本文采用蒙特卡罗法进行辐射传热计算,详细过程见文献[12]。

单层隔热材料的热设计计算流程如下:

- (1) 假设该层厚度初值;
- (2) 划分网格;
- (3) 温度场初始化;
- (4) 辐射换热计算,计算平均辐射热流密度及新一轮温度场;
- (5) 温度场收敛判断,如不收敛,则重复步骤(4),如收敛,进入步骤(6);
- (6) 计算层厚度;
- (7) 层厚度收敛判断,如不收敛,则重复步骤(1),如收敛,则结束。

多层隔热材料的热设计以单层隔热材料热设计为基础,对第  $i$  层隔热材料,其厚度为

$$\delta_i = \frac{\lambda_i}{\bar{q}_{ri}(\delta_i) - q^{\text{tot}}} (T_{i,w1} - T_{i,w2}) \quad (9)$$

式中,  $\lambda_i$ 、 $\delta_i$ 、 $T_{i,w1}$ 、 $T_{i,w2}$  分别为第  $i$  层隔热材料的热导率、厚度、高温边界温度和低温边界温度,  $\bar{q}_{ri}(\delta_i)$  为第  $i$  层隔热材料内全程平均辐射热流密度。

在单层隔热材料热设计基础上,结合多层隔热材料层厚度变化规律或层内温降变化规律,确定每层隔热材料厚度以及隔热结构总厚度,采用多层隔热结构总质量最小原则确定反射屏个数。

首先在反射屏均匀分布的情况下根据反射屏个数与多层隔热结构总质量的关系曲线,确定总厚度最小时的反射屏个数,然后再进行多层隔热材料热设计。

对多层隔热材料在给定隔热材料层厚度变化规律或层温降变化规律两种情况下进行了设计计算。按给定层温降变化规律设计时,对每一种多层结构的

层数目,容易确定每一个隔热材料层两边界温度。按照前述单层隔热材料厚度计算方法,从位于高温边界处的隔热材料层开始,依次计算出每一隔热材料层的厚度,从而得到隔热材料层的总厚度。按给定隔热材料层厚度变化规律设计时,由于隔热结构的总厚度未知,因此单个隔热材料层的厚度也是未知量,导致相邻隔热材料层间界面温度及每个隔热材料层内的温度分布均未知,这种情况下的热设计计算首先假设多层隔热材料总厚度,根据层厚度变化规律计算出每层厚度,然后从高温层开始,根据该层高温边界温度、层厚度、物性参数,计算出该层低温边界温度,依次对所有层进行计算,得到多层隔热材料低温边界温度计算值,对比低温边界温度计算值与热设计中的设定值更新多层隔热材料总厚度,直到总厚度收敛为止。

## 2 多层隔热材料热设计算例

多层隔热材料热设计算例已知设计条件为:总热流密度  $500 \text{ W/m}^2$ ,热边界温度  $1000 \text{ K}$ ,冷边界温度  $500 \text{ K}$ ,隔热材料热导率为  $0.1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 、折射率为  $1.0$ ,衰减系数为  $1000/\text{m}$ ,散射反照率为  $0$ 。

图2给出了反射屏均匀分布条件下,隔热材料层总厚度与反射屏个数的关系。可见,增加反射屏个数能够显著降低隔热材料层总厚度,特别是当反射屏个数  $< 100$  时;当反射屏个数  $> 200$  以后,进一步增加反射屏个数对隔热材料层总厚度的减少影响较弱。图中同时给出了反射屏发射率对隔热材料总厚度的影响,正如所预料的一样,随着发射率增大,辐射热流密度增高,导热热流密度减小,导热热阻增大,隔热材料总厚度增大。此外,在反射屏个数  $< 60$  时,单层隔热材料光学厚度较大,反射屏发射率对隔热材料层总厚度的影响较小;而当反射屏个数  $> 60$  时,反射屏的发射率对隔热材料层总厚度的影响相对较大。

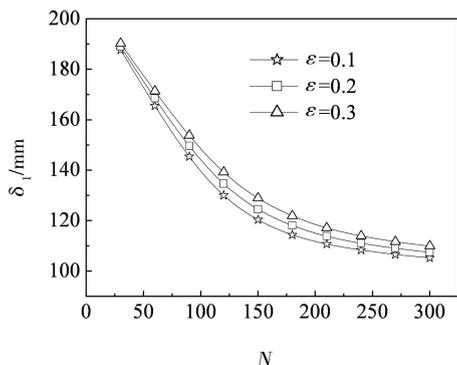


图2 隔热材料层总厚度与反射屏数目关系  
Fig. 2 Relationship between total thickness of insulation layers and screen number

的变化关系。可以看到,对给定的反射屏厚度,存在最佳的反射屏个数,使得多层隔热材料的总厚度最小。反射屏的最佳数目随着反射屏厚度的增加而减少,当反射屏厚度为  $0.1 \text{ mm}$  时,该数目为  $210$ ,当反射屏厚度为  $0.2 \text{ mm}$  时,该数目约为  $180$ 。

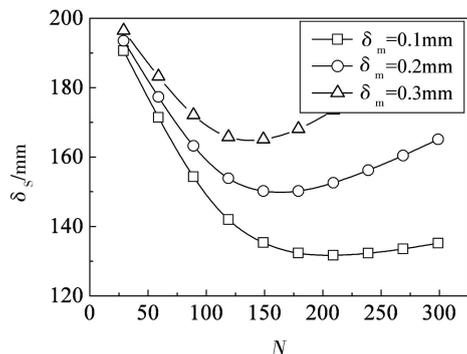


图3 多层隔热结构总厚度与反射屏数目关系  
Fig. 3 Relationship between MTI thickness and screen number

图4给出了隔热材料密度为  $200 \text{ kg/m}^3$ 、反射屏厚度为  $0.1 \text{ mm}$ 、发射率为  $0.1$  时,多层隔热结构的面密度(单位面积质量)与反射屏数目的关系。可以看到,当反射屏的面密度  $\rho_M$  低于  $0.2 \text{ kg/m}^2$  时,存在最佳的反射屏数目,使得多层隔热结构的面密度最小。在本算例中,最佳反射屏数目为  $120$ ,此时多层隔热结构总厚度大约为  $140 \text{ mm}$ ;当反射屏的面密度较高时,多层隔热结构的总质量随反射屏数目增大而单调增加。

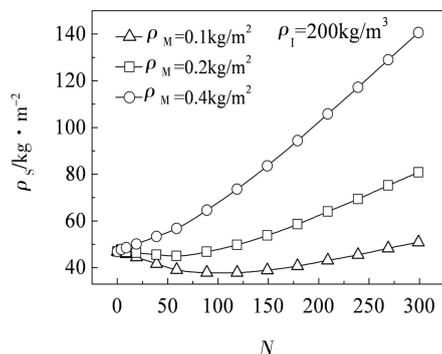


图4 多层隔热结构面密度与反射屏个数关系  
Fig. 4 Relationship between MTI weight and screen number

在反射屏面密度为  $0.1 \text{ kg/m}^2$  时,反射屏发射率为  $0.1$ ,反射屏个数为  $120$ ,对具有层等温降和等厚度规律的多层隔热材料进行了热设计计算。

图5给出了按照等温降规律设计时多层隔热材料中每层隔热材料厚度的变化规律,同时给出了按照等厚度规律设计时每层隔热材料的厚度,图中横坐标为隔热材料层的序号,紧靠近加热面的隔热材料层为第一层,纵坐标为该层隔热材料的厚度。可以看到按照等温降规律设计时,高温区域的隔热材料层厚度相对较厚。在按照等温降规律设计时隔热材料层的总厚度为129.5 mm,在按照等厚度规律设计时为125.9 mm,可见,按照等厚度规律设计比按照等温降规律设计更能够降低隔热材料的总厚度。由于反射屏的个数、厚度等参数是确定的,因此按照等厚度规律设计的多层隔热材料比按照等温降规律设计的多层隔热材料具有更轻的总质量。

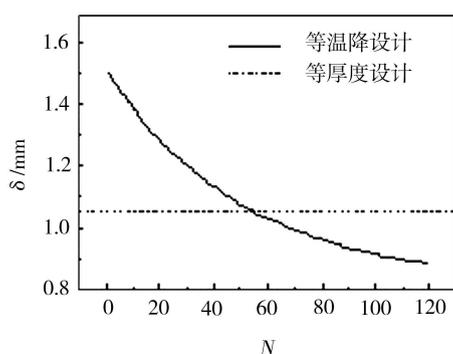


图5 等温降和等厚度设计条件下的隔热材料层厚度

Fig. 5 Each insulation layer thickness in two designs

### 3 结论

基于多层隔热材料稳态辐射导热耦合传热提出一种多层隔热材料热设计方法,根据反射屏分布规律实现多层隔热材料热设计,给出最优反射屏数目和每层隔热材料的厚度。

对具有层等温降与层等厚度特征的两种多层隔热材料开展的算例设计研究表明,采用层等厚度设计的多层隔热材料比采用层等温降设计的多层隔热材料具有更小的总质量,本文研究结果对多层隔热材料热设计研究具有一定的指导作用。

### 参考文献

- [1] Siegel R. Green's function to determine temperature distribution in a semitransparent thermal barrier coating [J]. *Journal of Thermophysics*, 1997, 11(2): 315-317
- [2] David E G, Ray D, Harold C. Materials development for hypersonic flight vehicles [R]. AIAA 2006-8122, 14<sup>th</sup> AIAA/AHI Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, 2006
- [3] Kamran D. Thermal analysis and design of multi-layer insulation for re-entry aerodynamic heating [R]. AIAA 2001-2834, 35<sup>th</sup> AIAA Thermophysics Conference, 2001
- [4] 马忠辉, 孙秦, 王小军, 等. 热防护系统多层隔热结构传热分析及性能研究 [J]. *宇航学报*, 2003, 24(5): 543-546
- [5] Spinnler M, Edgar R F, Viskanta R. Theoretical studies of high-temperature multilayer thermal insulations using radiation scaling [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2004, 84: 477-491
- [6] Spinnler M, Winter E R, Viskanta R. Studies on high-temperature multilayer thermal insulations [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, 47(6/7): 1305-1312
- [7] 白丹, 范绪箕. 航天器金属热防护结构非灰体隔热层传热计算 [J]. *南京航空航天大学学报*, 2005, 37(4): 403-407
- [8] Bai Dan, Fan Xuji. On the combined heat transfer in the multilayer non-gray porous fibrous insulation [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2007(104): 326-341
- [9] 闫长海, 孟松鹤, 陈贵清, 等. 金属热防护系统多层隔热结构的稳态传热分析 [J]. *航空动力学报*, 2006, 21(5): 800-804
- [10] 李东辉, 夏新林, 艾青. 多层高温隔热结构的传热特性 [J]. *宇航材料工艺*, 2011, 41(1): 20-23
- [11] Zeng S Q, Hunt A, Greif R. Theoretical modeling of carbon content to minimize heat transfer in silica aerogel [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1995, 186: 271-277
- [12] 谈和平, 夏新林, 刘林华, 等. 红外辐射特性与传输的数值计算 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006

(编辑 李洪泉)