

多层隔热材料传热特性研究现状及展望

李德富, 杨炜平, 刘小旭
(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要: 研究多层隔热材料的传热特性是进行航天器热控设计的基础。文章首先介绍了多层隔热材料的分类和应用情况, 及其传热方式和隔热性能表征方法; 然后评述了多层隔热材料传热特性和空间环境适应性的研究状况, 总结了相关研究方法、热分析模型与研究得出的基本认识; 最后, 提出了多层隔热材料热特性的进一步研究方向。

关键词: 多层隔热材料; 传热特性; 传热机理; 空间环境适应性

中图分类号: TK124

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2013)03-0302-08

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2013.03.015

0 引言

多层隔热材料 (Multi-Layer Insulation, 简称 MLI) 由高反射率的反射屏和低热导率的间隔层交替叠合而成。这种隔热组件利用屏面的层层反射, 对辐射热形成很高的热阻, 在真空下具有极好的隔热性能, 其当量热导率理论上可低至 $10^{-5} \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 以下的量级。多层隔热材料常用于航天器热控系统, 使航天器内部温度环境与剧烈变化的外部热环境隔离, 确保仪器设备工作在规定的温度范围内。除此之外, 多层隔热材料还在低温贮箱隔热、再入飞行器防/隔热方面得到广泛应用。

多层隔热材料的传热特性对于航天器热防护效能来说至关重要。本文对多层隔热材料的应用及其传热特性研究方法、热分析模型进行整理分析, 并提出了多层隔热材料传热特性研究的发展方向。

1 多层隔热材料的分类及其应用

根据使用温度范围, 多层隔热材料可分为低温、中温和高温 3 种类型^[1]。低温多层隔热材料的反射层底材一般是聚酯薄膜 (Mylar), 反射层为金属镀膜 (铝、银、金), 间隔层常用热导率低、质地疏松的低密度纤维纸或编织物; 其使用温度范围 $-200\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, 短期使用可至 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。中温多层隔热材料的反射层底材是聚酰亚胺薄膜 (Kapton), 反射层为金属镀膜 (铝、银、金), 间隔层采用玻璃纤维纸、布等; 其使用温度范围为 $-200\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$,

短期使用可达 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。高温多层隔热材料用金属箔 (不锈钢、镍、铝) 作为反射层, 用耐高温的高硅氧棉布、玻璃纤维布及其织物作为间隔层, 使用温度范围为 $-200\sim 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

中、低温多层隔热材料常用于卫星、空间站、飞船和运载火箭上面级等的热控制, 其表面温度较低, 瞬时所承受的加热热流以及总热负荷相对较小^[2]。在轨道空间的真空环境中, 多层隔热材料内部的传热方式有辐射换热和固体导热两种, 其中以以前者为主。由于中、低温多层隔热材料承受的热负荷较小, 所以不需要通过增加热质量以抵抗瞬态加热负荷。

高温多层隔热材料常应用于空间飞行器的发动机隔热屏、高超声速 (再入) 飞行器的热防护系统上。用于发动机的高温多层隔热材料, 主要的传热方式是辐射换热和固体导热。用于高超声速 (再入) 飞行器的多层隔热材料, 其表面温度很高, 热流密度很大, 传热方式主要表现为辐射换热、固体导热和气体对流换热。另外, 再入是一个相对长时间的加热过程, 需要足够的热质量以保证结构温度不超过允许使用范围。高温多层隔热系统在反射金属箔之间用纤维间隔层, 起到削弱金属箔之间的热辐射以及提供足够热质量以经受高瞬间热负荷的作用。如果间隔层纤维的密度大于 $20\text{ kg}/\text{m}^3$, 则自然对流可以忽略^[2-3]。

2 多层隔热材料的传热方式及其表征参数

与应用环境相关, 多层隔热材料内部的传热方式

收稿日期: 2013-03-05; 修回日期: 2013-05-11

作者简介: 李德富 (1981—), 男, 博士学位, 主要从事航天器热设计工作。联系电话: (010) 68198684。

可能包括^[4]辐射换热、气体/固体热传导以及对流换热。

在两个无限大且平行的灰体表面之间设置有 N 层反射层时, 则通过这两个表面的辐射换热的热流密度为^[5-7]

$$q = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{(N+1)\left(\frac{2}{\varepsilon} - 1\right)}, \quad (1)$$

式中: σ 为斯忒藩-玻耳兹曼常量; ε 是反射屏的发射率; T_1 和 T_2 分别是高温面和低温面的温度, K。

由于多层隔热材料内孔隙尺寸很小 (0.01 cm 甚至更小), 实际瑞利数远小于临界瑞利数 (~1000), 因此自然对流换热通常可以忽略^[8]。气体的热传导按克努森数 Kn 大小可划分为 3 种状态^[9-10]: 当 $Kn < 0.01$ 时, 为连续流状态; 当 $0.01 < Kn < 10$ 时, 为过渡流状态; $Kn > 10$ 时为自由分子流状态。根据不同状态下的热流密度计算公式可获得多层隔热材料内部的气体传导热流。

间隔层的固体接触热传导热流密度为^[11]

$$q_s = \frac{Cf\lambda(T_H - T_C)}{L}, \quad (2)$$

式中: C 为经验常数, 对于涤纶, $C=0.008$; f 为间隔层与固体材料的相对密度; L 为间隔层与反射层的实际间距, m; λ 为间隔材料的热导率, W/(m·K); T_H 、 T_C 分别为高温面、低温面的温度, K。

除了以上表征传热机制, 表征多层隔热材料传

热性能的参数主要还有当量热导率、当量换热系数和当量辐射率等^[12]。

3 多层隔热材料传热特性研究状况

3.1 低、中温多层隔热材料

3.1.1 传热特性研究方法及热模型

目前, 对中、低温多层隔热材料传热特性研究主要有试验研究法^[13-16]和计算分析法^[17-26]。在试验研究法方面: 江经善和张世伶^[13]通过试验测试了 4 种层密度下多层隔热材料的当量热导率、当量发射率和当量传热系数, 分析了压缩负荷和层密度对多层隔热材料传热性能的影响; Keller 等^[14]开展了揉皱的单面镀铝聚酯薄膜和两种反射层为双面镀铝聚酯薄膜的多层隔热材料的热特性试验研究, 分析了固体导热、气体导热和辐射换热的影响; Kawasaki 等^[15]试验研究了温度对多层隔热材料热性能的影响; 李永春等^[16]通过试验获得了真空环境下多层隔热材料层间温度差的分布趋势和不同层间隔热性能的优劣特性及其变化规律。

为了对多层隔热材料的传热性能进行详细分析, 发展了很多计算分析模型, 如表 1 所示^[27]。不同热分析模型所考虑的热影响因素不尽相同: 文献[17-22]考虑了固体导热和辐射换热对传热特性的影响; 文献[23-26]分析了固体导热、气体导热和辐射换热等传热机制。

表 1 多层隔热材料传热特性计算分析模型

Table 1 Analysis and empirical models for assessing the thermal performance of MLI

论文作者	固体导热模型	辐射换热模型	气体导热模型
Adulberg ^[17]	$q_c = \frac{\lambda(T_H - T_C)}{x}$	$\lambda_r = \frac{\varepsilon\sigma\lambda(T_H^2 - T_C^2)(T_H + T_C)}{(N+1)(2-\varepsilon)}$	—
Tien 和 Cunnington ^[18]	$q_c = \frac{\lambda(T_H - T_C)}{x}$	$q_r = \frac{n^2\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1 + 3\tau/4}$	—
Cunnington 和 Tien ^[19]	$q_c = \frac{C(T)\rho^d(T_H - T_C)}{Nx}$	$q_r = \frac{n^3\sigma\varepsilon_1\varepsilon_2(T_H^4 - T_C^4)}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}$	—
Matsuda ^[20]	$q_{ci} = C(T_{i+1} - T_i)$	$q_v = \frac{\sigma\varepsilon(T_j)\varepsilon(T_{j+1})(T_H^4 - T_C^4)}{\varepsilon(T_j) + \varepsilon(T_{j+1}) - \varepsilon(T_j)\varepsilon(T_{j+1})}$	—
Careen 和 Cunnington ^[21]	$\lambda_c = 3.65 \times 10^{-13}(T_H + T_C)\bar{N}^2/2$	$\lambda_r = \frac{1.1 \times 10^{-13}(T_H^2 - T_C^2)(T_H - T_C)}{N}$	—
Macgregor ^[22]	$q_c = \phi\lambda_s(T_H - T_C)/(N-1)x$	$q_r = \frac{\sigma(1-\phi)(T_H^4 - T_C^4)}{(N-1)(2/\varepsilon - 1)}$	—

续表 1

论文作者	固体导热模型	辐射换热模型	气体导热模型
Black ^[23]	$q_c = \frac{\lambda(T_H - T_C)}{x}$	$q_r = \frac{F_s \varepsilon \sigma (T_H^4 - T_C^4)}{N+1}$	$q_g = \frac{\alpha(\gamma+1)}{\gamma-1} \times \left(\frac{R}{8\pi TM}\right)^{1/2} \times p(T_H - T_C)$
Streed ^[24]	$q_c = 16(1-\delta^2)\lambda_s \left[\frac{1}{\ln(A_c) + \frac{\pi}{2(1-\delta)}} \right] \frac{\Delta T}{\Delta x}$ $A_c = 32[(1-\mu^2)(3\pi^2 C)/E(1-\delta^2)]^{2/3}$	$q_r = \frac{n^2 \sigma (T_H^4 - T_C^4)}{[(a+25)t/2] + (N-1)(2/\varepsilon - 1)}$	$\lambda_g = \alpha \lambda_g^* (\lambda/LS + \lambda)$
Bell ^[25]	$\lambda_c = (A-B)N^{2.91}/(T_H - T_C)$ $A = 6.54 \times 10^{-15}(T_H^2 - T_C^2)$ $B = 2.52 \times 10^{-18}(T_H^3 - T_C^3)$	$\lambda_r = \frac{1.36 \times 10^{-12}(T_H^{4.67} - T_C^{4.67})\varepsilon}{(T_H - T_C)N}$	$\lambda_g = \frac{\alpha(\gamma+1)}{2(\gamma-1)} \times \left(\frac{R}{2\pi TM}\right)^{1/2} \cdot p$
Folkman ^[26]	当量热导率公式 $\lambda_{eff} = CN^x$, $C = 5.05 \times 10^{-6}$, $x = 1.696$		

应根据中、低温多层隔热材料的的具体应用情况,选择与之相适应的热模型,如在地面存放阶段、发射过程和在轨运行过程中,材料的热影响因素是不同的。在进行热控系统设计和分析时,多层隔热材料的当量热导率、当量发射率等热特性参数应通过热分析模型的详细分析获得。

3.1.2 热特性基本认识

目前,国内外对多层隔热材料的热特性进行了大量研究,获得了层密度^[28-29]、环境压力^[30-32]、温度对多层隔热材料传热特性的影响。另外,航天器从地面到在轨飞行过程中,多层隔热材料所处环境的压力是变化的,为了使多层隔热材料的传热性能尽快达到稳定,一般需要在材料上打孔^[33]。李鹏等^[34-35]分析了打孔率对多层隔热材料传热性能的影响,图1是当量热导率随打孔率的变化。

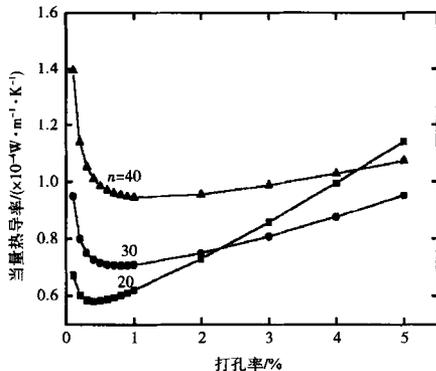


图1 当量热导率随打孔率的变化
Fig. 1 Variation of equivalent thermal conductivity with perforation coefficient

由图可知,随着打孔率的增加,当量热导率先减小后增大。因此,打孔率存在一个最佳值,且这个最佳值随着层密度的增加而增大。

3.2 高温多层隔热材料

3.2.1 传热特性研究方法

对高超声速(再入)飞行器的高温多层隔热材料进行传热特性分析主要有数值计算法和试验研究法。在对高温多层隔热材料进行热耦合分析时,也有两种方法。

第一种是对于多孔的光学厚介质材料,当量热导率可表示为^[36]

$$\lambda_{eff} = \lambda_c + \frac{16 n^2}{3 \beta} \sigma T_r^3, \quad (3)$$

式中: λ_c 是气体和固体导热部分的当量热导率; 等式右边第二项是基于罗斯兰扩散近似的辐射热导率, 其中 β 是衰减系数。式(3)只能用于光学厚介质, 不能对反射屏附近的辐射换热进行描述。

第二种方法是解能量守恒方程, 辐射的贡献通过求解辐射传递方程得出。无内热源的一维瞬态辐射和导热复合传热的能量守恒方程为^[3]

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial q'}{\partial x}, \quad (4)$$

式中 q' 是辐射热流。

求解吸收、散射性非灰体半透明材料内的光谱

辐射传递方程为^[10]

$$\frac{dI_{\lambda}(s, \Omega)}{ds} = \kappa_{\lambda}(1 - \omega_{\lambda})I_{b\lambda}(s) - \kappa_{\lambda}I_{\lambda}(s, \Omega) + \frac{\omega_{\lambda}\kappa_{\lambda}}{4\pi} \int_{4\pi} I_{\lambda}(s, \Omega')\Phi_{\lambda}(\Omega, \Omega')d\Omega' \quad (5)$$

式中: s 为材料内的坐标位置; $I_{b\lambda}(s)$ 为 s 点温度对应的黑体光谱辐射强度; $I_{\lambda}(s, \Omega)$ 为 Ω 方向到达 s 点的光谱辐射强度; ω_{λ} 和 κ_{λ} 分别为材料的光谱

散射反照率和光谱衰减系数; $\Phi_{\lambda}(\Omega, \Omega')$ 为光谱散射相函数。

高超声速(再入)飞行器的高温多层隔热材料的传热特性分析方法如表2所示。不同热分析方法所考虑的热影响因素不同,文献[37-39]只考虑了辐射换热,文献[2-3, 40-43]考虑了固体导热、气体导热和辐射换热,文献[44-45]则分析了固体导热、气体对流换热和辐射换热等传热机制。

表2 高温多层隔热材料传热特性分析方法

Table 2 Approaches for analyzing the thermal transfer performance of high-temperature MLI

作者	热分析方法	考虑的热影响因素
Cunnington等 ^[37]	光学薄近似	只近似分析了辐射换热
Keller等 ^[38-39]	光学厚近似	考虑了多层隔热材料辐射换热
Spinnler等 ^[3, 36]	比例近似法	考虑了纤维隔热结构内部的固体导热、气体导热和辐射换热,对多层隔热结构表观热导率进行了试验与理论研究
李东辉等 ^[40]	蒙特卡罗法结合有限体积法	考虑了纤维隔热结构内部的固体导热、气体导热和辐射换热,模拟反射屏几何布局、辐射特性、热物性及发射率等因素对隔热性能的影响
马忠辉 ^[41]	二热流法	考虑了多孔介质隔热结构内部的固体导热、气体导热和辐射换热
白丹和范绪箕 ^[42]	分别采用有限体积法和有限差分法求解能量守恒方程和辐射传递方程	考虑了非灰体纤维隔热材料的固体导热、气体导热和辐射换热
Daryabeigi等 ^[2, 43]	有限体积法和二热流法	考虑了纤维隔热材料的固体导热、气体导热和辐射换热,纤维间隔层中的辐射换热采用二热流法计算各项异性散射灰体介质
白丹和范绪箕 ^[44-45]	分别采用有限体积法和有限差分法求解固体能量方程和辐射传递方程,气体连续方程、动量方程和能量方程采用基于SIMPLE算法的有限体积法	考虑了非灰体纤维隔热材料的固体导热、气体对流换热和辐射换热

3.2.2 热特性基本认识

高温多层隔热材料传热特性的主要影响因素有温度,环境压力,材料厚度、密度,反射屏的热物性参数等^[3, 36, 40, 46],国内外对这些影响因素进行了大量研究,具体内容可见相关参考文献。下面重点对自然对流换热影响和非灰体计算模型影响进行介绍。

目前,在高温多层隔热材料传热特性的研究中一般都忽略自然对流换热的影响。白丹等^[44-45]分析了稳态和瞬态工况下自然对流对多层隔热结构温度的影响。图2是高孔隙率纤维多层隔热结构的温度变化曲线。稳态情况下,不考虑自然对流时的温度比考虑自然对流时的温度最多仅高3.86 K,可见

自然对流对多层隔热结构温度的影响很小,在计算时可以忽略。图3是瞬态工况下自然对流换热的影响。可以看出,尽管自然对流换热热流在总热流中所占比例很小(在750 s时,最大热流值为267 W/m²,占总热流的2.52%),但考虑自然对流与不考虑自然对流时的内部温度平均差值为19.25 K,最大可达56.97 K,因此在瞬态工况时要特别关注自然对流。

很多高温多层隔热材料是非灰体,即其辐射换热与波长相关。在分析传热特性时,将高温多层隔热材料看作灰体还是非灰体是有较大差别的。白丹^[45]通过分析表明,把硅纤维作为灰体材料来分析时对热防护系统设计会有很大的影响:用灰体法来设计非灰体材料会增加69.96%的单位总质量。因

此,在设计高超声速(再入)飞行器的多层隔热材料时,要认真分析多层隔热材料的消光系数(散射系数与衰减系数之比)、吸收系数以及相函数等热辐射特性参数。

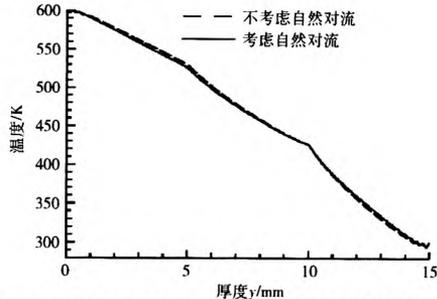


图2 自然对流对高孔隙率纤维多层隔热结构温度的影响
Fig. 2 Effects of natural convection on the temperature of high-porous multilayer fibrous insulation

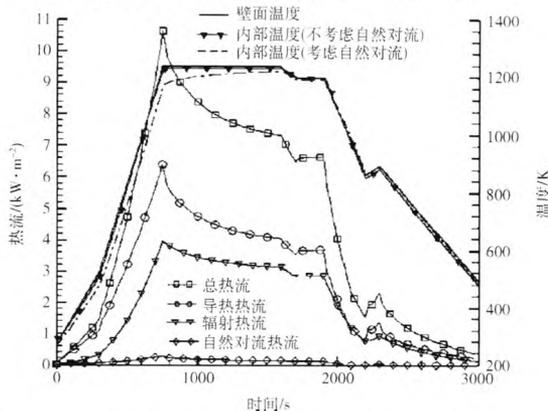


图3 自然对流对瞬态工况下高孔隙率纤维多层隔热结构传热的影响

Fig. 3 Effects of natural convection on the heat transfer of high-porous multilayer fibrous insulation under transient heat flux conditions

4 具空间碎片和气流冲刷防护能力的增强型多层隔热材料

国外对具空间碎片防护能力的增强型 MLI 方案进行了研究,并成功地应用于 RadarSAT 卫星上^[47]。国外采用的增强 MLI 碎片防护能力的措施主要有 3 种^[48-50]: 1) 增加多层隔热组件的层数; 2) 在多层隔热组件不同位置插入增强性材料, 譬如β布、Kevlar 纤维或 Nextel 陶瓷布等; 3) 用间隔条把多层隔热组件分成几组间距一定的多层隔热组件, 或者把多层隔热组件与安装表面之间用间隔条隔开一定的间距。

国内,韩海鹰等^[49]从原理分析、试验测试和数值模拟三个角度研究了 3 种增强措施对 MLI 隔热性能的影响,并采用超高速撞击试验的方法研究了多层隔热材料单元数,以及增强性材料添加层数、

添加位置和材料属性等因素对增强型 MLI 碎片防护性能的影响^[51]。试验结果显示,增加 MLI 单元数和添加增强性材料均可提高 MLI 的碎片防护能力,但提高幅度会随着添加层数的增加而变小。黄洁等^[52]试验研究了高速撞击对带多层隔热材料的蜂窝夹层的损伤模式。

大多数航天器均在 110 km 以上高度抛整流罩,此时航天器处于真空环境,气流对多层隔热材料的影响很小。低空抛罩时则导致航天器外表面的 MLI 破坏的可能因素有 3 种^[53]: 主动段气流剪切力的影响; 多层隔热材料鼓胀力的影响; 气流剪切力及 MLI 鼓胀力的共同作用。任红艳和赵欣^[53]对 67 km 高度下抛罩时多层隔热组件的破坏机理和防护方案进行了研究,采用的多层隔热组件防护方案如图 4 所示。

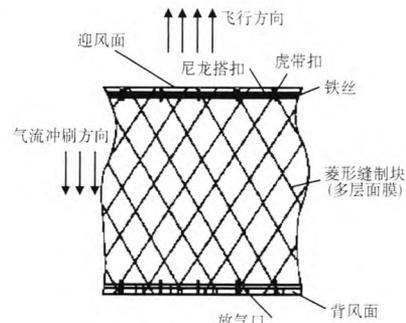


图4 多层隔热组件防护方案
Fig. 4 Protection scheme of MLI

5 多层隔热材料传热特性研究展望

多层隔热材料内部的传热机理复杂,涉及辐射换热、热传导和对流换热。在设计时,应详细分析这些传热方式对其传热性能的影响。尽管目前对多层隔热材料传热机理进行了大量研究,但仍不能满足航天器型号研制的需要。为了研究满足不同要求的新型多层隔热材料,需要进一步开展如下研究工作:

1) 多层隔热材料的辐射热物性研究

隔热材料和金属箔在不同温度范围内的辐射热物理特性相差较大,需试验测试它们在不同温度范围内的衰减系数、发射率等辐射热物性参数。尤其是在大气环境中使用的高温多层隔热材料,其中的金属箔在高温条件下可能会发生氧化反应而丧失高发射率的特性,因此需要通过试验测试多层隔热材料在实际飞行环境中的辐射热物性。

2) 多层隔热材料隔热性能的改进方法

研究新型低热导率隔热材料, 可采取改变多层隔热材料的结构、间隔尺寸、层间接触状态等措施, 如在镀铝层的表面进行氧化处理生成多孔氧化铝层, 能改善多层隔热材料的隔热性能^[54]。

3) 变密度多层隔热材料技术

为了满足长期在轨低温推进剂蒸发量的控制要求, 需要优化多层隔热材料, 即采用变密度设计: 在贮箱壁附近低温区布置低密度层, 在辐射换热强的高温区布置高密度层, 中间区域采用中密度层过渡。美国马歇尔空间飞行中心通过对液氢贮箱的试验表明, 采用变密度多层隔热材料后, 推进剂蒸发量比采用传统 MLI 降低了 58%, 而隔热材料质量减少了 41%^[11]。

4) 多层隔热材料传热特性的高效计算方法

目前用于多层隔热材料传热特性的数值计算方法大多很耗时。为了满足工程设计的要求, 需要发展高效和适应性强的计算方法。

5) 轻质的高温多层隔热材料技术

高超声速(再入)飞行器的热防护系统质量占比是很大的, 研究轻质高温多层隔热材料(如纳米隔热材料)是今后的发展方向之一。

6) 高温多层隔热材料与航天器结构一体化设计技术

高温多层隔热材料与航天器结构一体化设计是未来的发展方向之一。通过一体化设计, 能充分发挥隔热材料和结构材料的性能, 减轻结构重量, 降低发射成本。

参考文献 (References)

- [1] 闵桂荣. 航天器热控制技术[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 110-132
- [2] Daryabeigi K, Miller S D, Cunnington G R. Heat transfer in high-temperature multilayer insulation[C]// Proceedings of the 5th European Workshop. Noordwijk: European Space Agency, 2006: 43-50
- [3] Spinnler M, Winter E R F, Viskanta R. Studies on high-temperature multilayer thermal insulations[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47(6): 1305-1312
- [4] 何知朱. 新型热控材料器件及应用[M]. 北京: 宇航出版社, 1988: 56-80
- [5] 闵桂荣. 卫星热控制技术[M]. 北京: 宇航出版社, 1991: 177-180
- [6] 侯增祺, 胡金刚. 航天器热控制技术——原理及其应用[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2007: 145-151
- [7] Gilmore D G. Spacecraft thermal control handbook volume I: fundamental technologies[M]. California: The Aerospace Press, 2002: 161-206
- [8] Tien C L, Cunnington G R. Cryogenic insulation heat transfer[J]. Advances in Heat Transfer, 1973, 9: 349-417
- [9] 陈国邦, 张鹏. 低温绝热与传热技术[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 1-152
- [10] Karam R. Satellite thermal control for systems engineers[M]. California: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1998: 1-123
- [11] Hastings L J, Hedayat A, Brown T M. Analytical modeling and test correlation of variable density multilayer insulation for cryogenic storage, NASA TM 2004-213175[R]
- [12] Krishnaprakas C K, Narayana K B. Heat transfer correlations for multilayer insulation systems[J]. Cryogenics, 2000, 40: 431-435
- [13] 江经善, 张世伶. 多层隔热材料的性能研究[J]. 中国空间科学技术, 1988(1): 64-70
Jiang Jingshan, Zhang Shiling. Investigation of multilayer insulation materials[J]. Chinese Space Science and Technology, 1988(1): 64-70
- [14] Keller C W, Cunnington G R, Glassford A P. Thermal performance of multilayer insulations, NASA CR1974-134477[R]
- [15] Kawasaki H, Okazaki S, Sugita H. Temperature dependence of thermal performance in space using multilayer insulation, AIAA 2012-3407[R]
- [16] 李永春, 刘强, 马洪炯, 等. 真空环境中多层隔热材料的隔热性能[J]. 宇航材料工艺, 2012(4): 90-92
Li Yongchun, Liu Qiang, Ma Hongjiong, et al. Thermal properties of multilayer insulation materials in vacuum[J]. Aerospace Materials & Technology, 2012(4): 90-92
- [17] Adulberg M. Effective thermal conductivity and multilayered insulation[J]. Advances in Cryogenic Engineering, 1960(12): 252-254
- [18] Tien C L, Cunnington G R. Cryogenic insulation heat transfer[J]. Advances in Heat Transfer, 1973(9): 349-417
- [19] Cunnington G R, Tien C L. A study of heat transfer processes in multilayer insulation[J]. Progress in Astronautics and Aeronautics, 1970, 23: 111-125
- [20] Matsuda A, Yoshikiyo H. Simple structure insulated material properties of multilayer insulation[J]. Cryogenics, 1980, 20: 135-138

- [21] Careen R P, Cunnington G R. Heat transfer in multilayer insulation[J]. Chemical Engineers Symposium Series, 1967, 64: 67-81
- [22] Macgregor R K. Numerical evaluation of multilayer insulation performance[J]. Progress in Astronautics and Aeronautics, 1971, 24: 502-518
- [23] Black J A, Fowle A A, Glasser P E. Development of high efficiency insulation[J]. Advances in Cryogenic Engineering, 1959, 5: 181-188
- [24] Streed E R, Cunnington G R, Zierman C A. Performance of multilayer insulation system for 300~800 K temperature range[J]. Progress in Astronautics and Aeronautics, 1965, 18: 735-772
- [25] Bell G A, Nast T C, Wedel R K. Thermal performance of multilayer insulations applied to small cryogenic tankage[J]. Advances in Cryogenic Engineering, 1975, 22: 273-282
- [26] Folkman N R, Lee T G. Thermodynamic design fundamentals of high performance insulation[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1968, 5(8): 954-959
- [27] Bapat S L, Narayankhedkar K G, Lukose T R. Performance prediction of multilayer insulation[J]. Cryogenics, 1990, 30: 700-710
- [28] 江经善. 多层隔热材料及其在航天器上的应用[J]. 宇航材料工艺, 2000(4): 17-25
Jiang Jingshan. Multilayer insulation materials and their application to spacecrafts[J]. Aerospace Materials & Technology, 2000(4): 17-25
- [29] Keller C W. Thermal performance of multilayer insulations, NASA CR1971-72747[R]
- [30] Black I A, Glaser P E, Lindstrom R S, Ruccia F E, Wechsler A E. Thermal insulation systems: a survey, NASA SP 1967-5027[R]
- [31] 孙培杰, 吴静怡, 张鹏, 等. 层间稀薄气体传热对多层绝热材料性能的影响分析[J]. 低温与超导, 2008(9): 11-17
Sun Peijie, Wu Jingyi, Zhang Peng, et al. Analysis of the effects of rarefied gas heat transfer characteristics on degraded vacuum multilayer insulation material[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2008(9): 11-17
- [32] 李德富, 杨炜平, 刘小旭. 隔热材料传热特性分析[C]//中国航天第八专业信息网2012年度技术信息交流会. 北京强度环境研究所, 2012
- [33] Tien C L, Cunnington G R. Radiation heat transfer in multilayer insulation having perforated shields, AIAA 1973-718[R]
- [34] 李鹏, 程惠尔, 秦文波. 多层打孔隔热材料空间应用热性能研究[J]. 宇航材料工艺, 2006(z1): 18-22
Li Peng, Cheng Huier, Qin Wenbo. Thermal performance study of multilayer perforated insulation material for space application[J]. Aerospace Materials & Technology, 2006(z1): 18-22
- [35] Li Peng, Cheng Huier. Thermal analysis and performance study for multilayer perforated insulation material used in space[J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26: 2020-2026
- [36] Spinnler M, Winter E R F, Viskanta R, et al. Theoretical studies of high-temperature multilayer thermal insulations using radiation scaling[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2004, 84: 477-491
- [37] Cunnington G R, Zierman C A, Funai A, et al. Performance of multilayer insulation systems for temperatures to 700 K, NASA CR1967-907[R]
- [38] Keller K, Blumenberg J, Tomsik J. Fibre orientation and the conduction of heat by a gas enclosed in ceramic layers[J]. Journal of Flight Sciences and Space Research, 1988, 12(4): 258-260
- [39] Keller K, Hoffmann M, Zörner W, et al. Application of high temperature multilayer insulations[J]. Acta Astronautica, 1992, 26(6): 451-458
- [40] 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(1): 20-23
Li Donghui, Xia Xinlin, Ai Qing. Heat transfer characteristics of high temperature multilayer thermal insulations[J]. Aerospace Materials & Technology, 2011(1): 20-23
- [41] 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: 西北工业大学博士学位论文, 2004
- [42] 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
Bai Dan, Fan Xuji. Numerical simulation of coupled heat transfer in thermal insulation with non-gray media for metallic thermal protection systems[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2005, 37(4): 403-407
- [43] Daryabeigi K. Thermal analysis and design optimization of multilayer insulation for reentry aerodynamic heating[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2002, 39(4): 509-514
- [44] 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
- [45] 白丹. 非灰体纤维隔热结构热分析与优化设计[D]. 上海交通大学博士学位论文, 2006
- [46] 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): 542-545

- Ma Zhonghui, Sun Qin, Wang Xiaojun, et al. TPS multi-layer insulation thermal analysis and performance study[J]. *Journal of Astronautics*, 2003, 24(5): 542-545
- [47] Terrillon F, Warren H R, Yelle M J. Orbital debris shielding design of the RADARSAT spacecraft, IAF-1991-283[R]
- [48] Walker R, Klinkrad H, Sdunnus H, et al. Update of the ESA space debris mitigation handbook[C]// *Proceedings of the Third European Conference on Space Debris*. Noordwijk: ESA Publications Division, 2001: 821-826
- [49] 韩海鹰, 郑建东, 黄家荣, 等. 增强型MLI碎片防护能力的超高速撞击试验研究[J]. *宇航学报*, 2012, 33(1): 140-144
- Han Haiying, Zheng Jiandong, Huang Jiarong, et al. Study of debris shield performance of enhanced MLI by hypervelocity impact tests[J]. *Journal of Astronautics*, 2012, 31(1): 140-144
- [50] Robinson J H. The effectiveness of multi-layer insulation as meteoroid and orbital debris shielding, AIAA 1992-1460[R]
- [51] 韩海鹰, 黄家荣, 程文龙, 等. MLI碎片防护能力增强措施对隔热性能的影响[J]. *宇航学报*, 2010, 31(1): 259-263
- Han Haiying, Huang Jiarong, Cheng Wenlong, et al. The influence of debris shield enhancement on thermal insulation performance of MLI[J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(1): 259-263
- [52] Huang Jie, Ma Zhaoxia, Lan Shengwei. The characteristic of honeycomb sandwich with multi-layer insulation under hypervelocity impact[C]//61st International Astronautical Congress, 2010
- [53] 任红艳, 赵欣. 低空环境中多层隔热组件的破坏机理研究及防护[J]. *航天器环境工程*, 2008, 25(6): 523-526
- Ren Hongyan, Zhao Xin. The failure mechanism of multilayer insulation (MLI) in low-altitude environment and its protection[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2008, 25(6): 523-526
- [54] 陈金静, 于伟东. 轻薄柔性多层隔热材料研究进展[J]. *材料导报*, 2008, 22(6): 41-44
- Chen Jinjing, Yu Weidong. Research progress in thin flexible multilayer thermal insulation materials[J]. *Materials Review*, 2008, 22(6): 41-44

Heat transfer characteristics of multilayer insulation materials

Li Defu, Yang Weiping, Liu Xiaoxu

(Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: The knowledge of the heat transfer characteristics of multilayer insulation materials is essential for the design related with the thermal control and the heat reservation (insulation). This paper discusses first the classification and the application fields of multilayer insulation materials, then their heat transfer mechanism and the characterization methods. After that, the research advances in the thermal characteristics and the space environmental applications of multilayer insulation materials are reviewed, including the methods, the thermal models and typical results. Suggestions of future research areas of the heat transfer characteristics of multilayer insulation materials are made.

Key words: multilayer insulation materials; heat transfer characteristics; heat transfer mechanism; space environmental applicability

(编辑: 肖福根)