

多层隔热材料及其在航天器上的应用

江经善

(北京空间飞行器总体设计部 北京 100086)

摘 要 综述了多层隔热材料的隔热原理、隔热性能表征方法、组成、性能,以及在航天器上的应用。通过选用不同的反射屏和间隔物可得到一系列常温、中温和高温使用的多层隔热材料。对于以双面镀铝聚酯薄膜为反射屏的常温多层材料,采用疏松纤维、网、泡沫塑料的间隔物,均有良好的隔热性能,其当量热导率可达 $10^{-4} \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 的量级。

关键词 多层隔热材料,航天器

Multilayer Insulation Materials and Their Application to Spacecrafts

Jiang Jingshan

(Beijing Institute of Spacecraft System Engineering Beijing 100086)

Abstract Heat insulating principle, characterizing method, composition and properties as well as application to spacecrafts for multilayer insulation materials (MLI) is reviewed. A series of MLI employed at normal temperature, middle temperature and high temperature can be obtained by choosing different reflection shields and spacer. For double-aluminized mylar MLI, excellent heat insulation performance with a equivalent thermal conductivity of about $10^{-4} \text{ W/m}\cdot\text{K}$ is received by either using loose fibers, net or polyfoam as spacer materials.

Key words Multilayer insulation material, Spacecraft

1 引言

地球轨道上的航天器受到太阳光的直接照射以及温度为 4 K 的冷空间的热辐射,如不进行专门的热设计,正对太阳光的航天器表面温度可高达 +200 以上,而背对太阳光的航天器表面温度可低到 -200 以下,所以为了保证航天器及其仪器设备的正常工作,必须对航天器进行专门的热设计。最有效的办法就是在航天器表面覆盖隔热性能优异的多层隔热材料,它是一种由多层反射屏迭合而成的隔热材料,也可由多层反射屏与间隔物迭合而成。在真空条件下,多层隔热材料的隔热性能比常用的隔热材料(泡沫塑料)好 2 个数量级左右,被誉为超级绝热材料。

2 多层隔热材料的隔热原理^[1~5]

若有两个间距尺寸比长宽尺寸小很多的平行平面,且它们具有灰体的性质和处于真空状态,那么它们之间的辐射传热热流量 q 为:

$$q = \frac{A(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \quad (1)$$

式中:

为斯狄芬—玻耳兹曼常数;

为平面 1 或平面 2 的表面积;

T_1 、 T_2 分别为平面 1 和平面 2 的热力学温度;

ϵ_1 、 ϵ_2 分别为平面 1 和平面 2 的发射率。

收稿日期:1999-08-25

江经善,1941 年出生,研究员,主要从事航天器热控系统研制工作

当两表面的发射率一样时,即 $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon$, 上式可简化为:

$$q = \frac{A(T_1^4 - T_2^4)}{2\epsilon - 1} \quad (2)$$

若在上述两平行平面间,置入一个大小相同、表面发射率一样的平行平面(一般将该平面称为反射屏或隔热屏),那么上述两平行平面间辐射传热的热流量 q 为:

$$q = \frac{A(T_1^4 - T_2^4)}{2(\frac{2}{\epsilon} - 1)} \quad (3)$$

如果在上述两平行平面间置入 N 个反射屏,那么它们间的辐射传热热流量 q 为:

$$q = \frac{A(T_1^4 - T_2^4)}{(N+1)(\frac{2}{\epsilon} - 1)} \quad (4)$$

比较式(2)和式(4)可见,在两个平行平面间,加置 N 层反射屏后,两平行平面之间的辐射传热热流

量可减小到原来的 $\frac{1}{N+1}$,起到了明显的隔热作用。

如果反射屏之间有间隔物时,式(4)就变为:

$$q = \frac{n^2}{(N+1)(\frac{2}{\epsilon} - 1) + (a+2s)\frac{2}{\epsilon}} \cdot A(T_1^4 - T_N^4) \quad (5)$$

式中:

n 为间隔物的折射指数;

T_N 为第 N 层反射屏的热力学温度;

a 为间隔物的吸收系数;

s 为间隔物的散射系数;

为间隔物的总厚度。

这里的 n 、 a 、 s 取决于间隔物的类型、间隔物的体积分数,以及反射屏之间气体的光学特性。通常 n 可取为 1,一些材料的 a 、 s 值如表 1 所示。由式(5)可见,当表面发射率较小时,上述间隔物吸收系数和散射系数的影响可忽略不记。

表 1 间隔物的吸收系数和反射系数^[4]

Tab. 1 Absorption and scattering coefficients for spacer materials

间隔物	密度/ kg m ⁻³	厚度/ μm	纤维直径/ μm	温度/ K	吸收系数/ m ⁻¹	散射系数/ m ⁻¹
Dexiglass (玻璃纤维)	200	76.2	< 1.00	500	130 ×10	760 ×10 ²
				650	110 ×10	270 ×10 ²
				800	110 ×10	280 ×10 ²
				100 ×10	700	310 ×10 ²
Tissuglass (硼硅玻璃纤维)	220	15.2	< 1.00	500	300	265 ×10 ²
				650	110 ×10	280 ×10 ²
				800	110 ×10	300 ×10 ²
Refrasil A—100 (高硅氧纤维)	50.0	48.3	1.30	500	< 200	380 ×10
				650	< 200	570 ×10
				800	< 200	730 ×10
				100 ×10	< 200	760 ×10
Refrasil B—100 (高硅氧纤维)	50.0	48.3	10.0	500	< 200	330 ×10
				650	< 200	500 ×10
				800	< 200	710 ×10
碳纤维纸			10.0	775	400	385 ×10 ²
				923	200	260 ×10 ²
				112 ×10	200	185 ×10 ²

需要指出,上述分析是一种理想情况下的传热过程。而实际上,反射屏不是悬空放置的,相互之间有一定的接触,因此在它们之间不仅有上述的辐射传热,而且还有相当数量的接触导热。接触导热的数量有时可以是比较大的,甚至超过前者。反射屏间接触导热的量主要取决于反射屏的材质、平整度及其表面状态、多层隔热材料(及反射屏的组合)的压缩负荷和松紧程度等因素。对有间隔物的情况,还与间隔物的结构、性能及其表面状态有关。

3 多层隔热材料隔热性能表征方法

在多层隔热材料实际应用时,它的隔热性能有三种表征方法,即当量热导率(或称有效热导率)、当量发射率(或称有效发射率)和当量传热系数(或称有效传热系数)。

3.1 当量热导率

将多层隔热材料看成是一种结构连续、性质均匀的固体,垂直通过它的热流量 q ,用傅立叶公式计算。

$$q = A \cdot \lambda_{eq} (T_H - T_C) \quad (6)$$

式中:

λ_{eq} 为多层隔热材料的当量热导率;

A 为垂直于热流方向的多层隔热材料面积;

T_H 、 T_C 分别为多层隔热材料热、冷边界的温度;

δ 为多层隔热材料的总厚度。

应用当量热导率的最大优点在于通过把多层隔热材料看成是一个结构连续、性质均匀的固体(它的热导率取该多层隔热材料的当量热导率),包含多层隔热材料的航天器的传热问题就可用一般的传热理论和公式直接进行分析计算。也可用于不同多层隔热材料及其与其它隔热性能直观比较。

但需要注意,多层隔热材料实际上并非是一种真正结构连续、性质均匀的固体,而是一种由多层反射屏叠合而成的组合材料,在反射屏之间还常常以不同形式间隔不同种类、不同厚度的间隔物。因而多层隔热材料的当量热导率不仅与反射屏、间隔物的种类、厚度、表面状态有关,而且还与它们的组合形式、多层隔热材料的总层数、层密度、冷热边界温度、所受的压缩负荷、所处的真空度等因素有关。而

且多层隔热材料的当量热导率 λ_{eq} 不是某种多层隔热材料的热物性,而是与特定条件相对应的多层隔热材料的性能。

在应用这个性能参数时,必须注意它的特定条件。特别要注意,即使其它都一样,总层数不一样的多层隔热材料,其当量热导率也是不一样的,例如,其它条件都一样的多层隔热材料,总反射屏层数为10层的多层隔热材料,其当量热导率要低于反射屏总层数为20层的多层隔热材料的当量热导率。

3.2 当量发射率

也可将多层隔热材料看成是组合发射率为 ϵ_{eq} 的热控涂层,这样垂直通过多层隔热材料的热流量 q ,就可用辐射传热的公式进行计算。

$$q = A \cdot \epsilon_{eq} (T_H^4 - T_C^4) \quad (7)$$

式中:

ϵ_{eq} 为多层隔热材料的当量发射率。

用当量发射率来表征多层隔热材料隔热性能的优点是通过将某一多层隔热材料看成为组合发射率为 ϵ_{eq} 的热控涂层,则该多层隔热材料的隔热效果可直接由当量发射率的大小来进行判断,及当量发射率越小,多层隔热材料的隔热效果就越好。也只需将多层隔热材料的当量发射率看作为冷、热边界的组合发射率,就可直接应用辐射传热公式进行热分析计算。

但需要注意,当量发射率不是多层隔热材料的热物性,而是某一特定多层隔热材料隔热效果的表征。

对于理想的多层隔热材料,其当量发射率 ϵ_{eq} 为

$$\epsilon_{eq} = \frac{1}{(N+1)(2-\epsilon_r)} \quad (8)$$

式中:

ϵ_r 为多层隔热材料反射屏的发射率;

N 为多层隔热材料反射屏的层数。

3.3 当量换热系数

也可用当量换热系数来表征多层隔热材料的隔热性能。根据牛顿冷却公式,垂直通过多层隔热材料的热流量 q 为:

$$q = K_{eq}A(T_H - T_C) \quad (9)$$

由式(6)、(7)、(9)可以得到,对于同一多层隔热材料来说,上述三个参数的相互关系为:

$$K_{eq} = \frac{1}{\left(\frac{1}{K_{eq}}\right) + \left(\frac{1}{K_{eq}}\right)} = \frac{1}{\left(\frac{1}{K_{eq}}\right) + \left(\frac{1}{K_{eq}}\right)} \quad (10)$$

4 多层隔热材料的组成^[3~5]

多层隔热材料一般主要由反射屏和间隔物两部分组成。

4.1 反射屏

用于反射屏的材料主要有两类:一类是低发射率的金属箔,如铝箔、铜箔、金箔、镍箔、钼箔、不锈钢箔等;另一类是表面蒸镀金属层的塑料薄膜,如蒸镀有金或铝的聚脂薄膜或聚酰亚胺薄膜。

铝箔和镀铝聚脂薄膜是应用最多的两种反射屏材料,其成本低、生产工艺成熟、表面发射率低,在空气中只需形成一层很薄的氧化物就能起到良好的保护作用。湿气对镀铝薄膜影响较大,可使铝膜变色。为防止湿气的的作用,可再蒸镀一层 0.05 μm 的锗保护层。

从隔热性能来看,铝箔要比镀铝聚脂薄膜好 1~2.5 倍,但铝箔的抗撕强度不及后者,至少要厚 25 μm~125 μm 才可实际使用。而镀铝聚脂薄膜强度较好,例如 6.35 μm 厚镀铝聚脂薄膜的抗撕强度比 12.7 μm 厚的铝箔还好,而且前者密度还小。因而在使用温度不高的情况下,镀铝聚脂薄膜应用最多,铝箔主要用于温度较高的场合。

金发射率低、耐潮湿、耐老化,但金箔成本要比铝箔高得多,且生产工艺比较复杂,所以只用于一些要求较高的场合。常用的为镀金聚酰亚胺薄膜。其它金属箔一般用于温度较高的场合。

在蒸镀金属层的塑料薄膜中,应用最多的是聚脂薄膜,其最高工作温度为 420 K,聚碳酸脂薄膜性能与聚脂薄膜相仿,且密度小。聚酰亚胺薄膜在室温下的强度与聚脂薄膜相当,且最高工作温度可达 672 K,但其价格高,只用于温度较高的场合。

由于塑料薄膜本身的发射率较高,所以蒸镀金属膜的厚度对发射率影响比较明显。例如,在聚脂

薄膜上蒸镀纯铝,铝膜厚度为 0.02 μm 时,表面发射率为 0.035,铝膜厚度要达到 0.1 μm 时,表面发射率才基本达到稳定值 0.022。同样在聚脂薄膜上蒸镀纯金,金膜厚度要达到 0.2 μm 时,表面发射率才基本达到稳定值 0.015。

4.2 间隔物

用作间隔物的材料主要有疏松纤维、纤维布、网状织物、泡沫塑料等。有时也可不用间隔物,而是将表面蒸镀金属层的塑料薄膜揉皱、压花,来减小反射屏之间接触传热量。

疏松纤维的材料可以是玻璃纤维、高硅氧纤维、石英纤维、合成纤维和棉纤维等,通常制成厚度为 70 μm~700 μm 的纤维纸使用。间隔这类间隔物后,反射屏间的接触传热需通过反射屏与纤维、纤维本身、纤维与纤维,以及纤维与反射屏间的传热才能实现,因而接触热阻很大,能有效地隔热。但其尺寸稳定性差,如采用粘接的方法,又会降低接触热阻。通常采用缝合的办法,既增加尺寸稳定性,又不明显降低隔热性能。此外,这类间隔材料密度较大,且易吸湿。

纤维布的材料可以是玻璃纤维、高硅氧纤维、石英纤维等,它的尺寸稳定性要优于疏松纤维,但隔热性能要低于疏松纤维,一般用于高温的场合。

网状织物的材料可以是天然丝、尼龙丝、涤纶丝或玻璃纤维。一般网厚 75 μm~600 μm,网孔尺寸为 1.5 mm~6.4 mm。这类间隔物尺寸稳定性好,质量轻,放气率低,且易于抽真空,因此得到了广泛的应用。

泡沫塑料的热导率低、尺寸稳定性好,也可作为间隔物,它的厚度一般在 1 mm 以下,但这种间隔物抽真空比较困难。

5 多层隔热材料的性能参数

5.1 无间隔物多层隔热材料的性能

表 2 列出了无间隔物多层隔热材料的性能^[6,7]。由表可见,对于无间隔物的多层隔热材料,蒸镀金属膜聚脂薄膜的隔热性能要比未镀金属膜聚脂薄膜的隔热性能好一个多数量级。而由于层密度的差异,多层隔热材料间的隔热性能也可有较大的差异。

表 2 无间隔物多层隔热材料的性能

Tab.2 Insulation performance of multilayer insulations materials(MLI) with no spacer

材料	反射屏				总厚度 /mm	层密度 /层 cm^{-1}	当量发射率 / 10^{-2}	当量热导率 / $10^{-4} \text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	试验温度/	
	厚度 / μm	层数	镀层	状态					T_H	T_C
聚脂薄膜	6.40	35.0	无	揉皱	12.7	27.6	6.09	15.2	22.2	- 197
	6.40	34.0	单面镀金	揉皱	12.7	26.8	0.26	0.64	21.7	- 198
	6.40	35.0	单面镀铝	揉皱	12.7	27.6	0.22	0.55	22.8	- 197
	6.40	35.0	单面镀铝	揉皱	21.5	16.3	0.23	0.95	22.2	- 198
	10.0	30.0	单面镀铝		5.00	60.0	1.16	2.88	29.0	- 147
	9.00	22.0	单面镀铝		5.00	44.0	1.22	1.29	- 17.7	- 117
聚酰亚胺薄膜	6.40	20.0	单面镀金	揉皱	10.2	19.6	0.25	0.48	19.4	- 196
	12.7	20.0	单面镀金	揉皱	10.2	19.6	0.37	1.33	22.2	- 45.6

图 1 示出了由揉皱单面镀铝聚脂薄膜组成的多层隔热材料,其当量热导率随层密度的变化曲线^[4]。聚脂薄膜的厚度为 $6.35 \mu\text{m}$,共 20 层,试件不加压时的厚度为 3.29cm ,试验压力小于 $1.3 \times 10^{-3} \text{Pa}$ 。

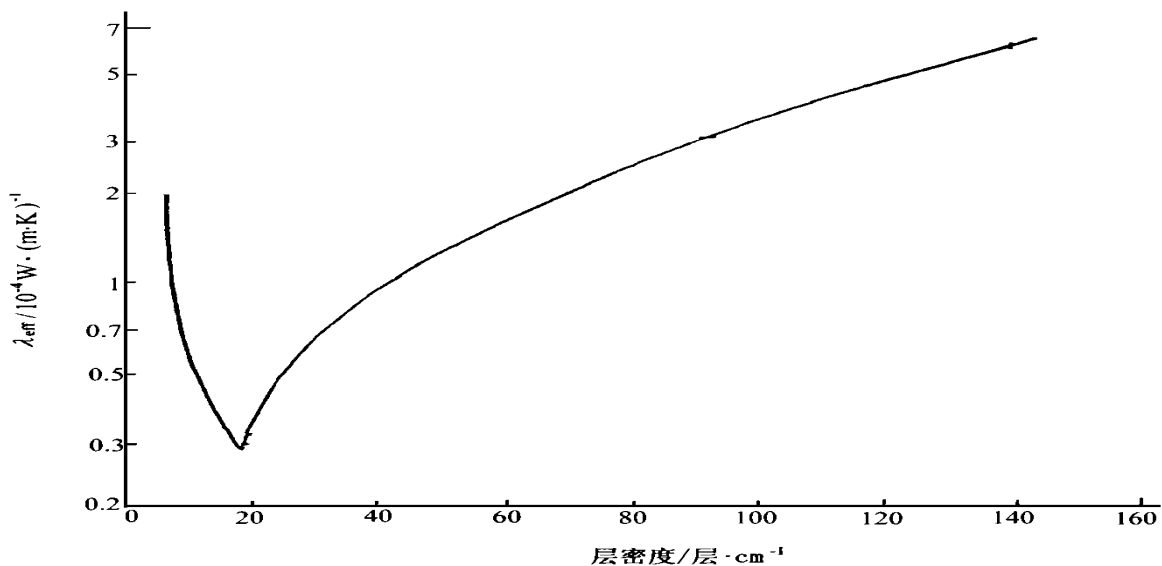


图 1 揉皱的单面镀铝聚脂薄膜多层隔热材料的当量热导率随层密度的变化曲线

Fig. 1 Equivalent thermal conductivity λ_{eq} vs. the number of radiation shields per unit thickness N/t for single-aluminized mylar crinkled

5.2 双面镀铝聚脂薄膜——疏松纤维多层隔热材料的性能

表 3 列出了由双面镀铝聚脂薄膜和疏松纤维或纤维布组成的多层隔热材料的性能^[8,9]。

表3 双面镀铝聚脂薄膜——疏松纤维、纤维布多层隔热材料的性能
Tab.3 Insulation performance of double-aluminized mylar-glass fabric MLI

反射屏			间隔物			多层隔热材料			试验温度/	
材料	厚度/ μm	层数	材料	厚度/ μm	层数	总厚度/ mm	层密度/ 层·cm ⁻¹	当量热导率/ 10 ⁻⁴ W·(m·K) ⁻¹	T _H	T _C
双面 镀铝 聚脂 薄膜	10.0	30	玻璃纤维纸	50.0	30	20.0	15.0	2.67	14.0	-196
		34	玻璃纤维毡	200.0	34	30.0	11.3	2.27	20.0	-196
	20.0	33	玻璃纤维布	60.0	33	16.5	20.0	1.27	24.0	-196
		33	玻璃纤维纸	50.0	33	17.0	19.4	1.11	23.0	-196
		66	玻璃纤维纸	50.0	66	30.0	21.6	3.52	80.0	-196
		34	敷料纸		34	34.0	34.0	3.53	44.9	-80.8

5.3 双面镀铝薄膜——网状间隔物多层隔热材料的性能

表4列出了以双面镀铝聚脂薄膜为反射屏,尼龙网、涤纶网为间隔物的多层隔热材料的性能

能^[10,11]。由表可见以大孔眼涤纶网为间隔物的多层隔热材料具有良好的隔热性能。而在每对反射屏间,加置2~3层间隔物,可进一步提高多层隔热材料的隔热性能。

表4 双面镀铝聚脂薄膜——网状间隔物多层隔热材料的性能*
Tab.4 Insulation performance of double-aluminized mylar-net spacers MLI

反射屏			间隔物		多层隔热材料				试验温度/	
材料	厚度/ μm	层数	材料	层数	总厚度/ mm	层密度/ 层·cm ⁻¹	当量发射率/ 10 ⁻¹	当量热导率/ 10 ⁻⁴ W·(m·K) ⁻¹	T _H	T _C
双面 镀铝 聚脂 薄膜	10.0	23	尼龙网	23	5.40	46.0	0.16	9.8	117	25.0
		29	尼龙网	29	9.40	30.9	0.18	11.6	130	25.9
		29	尼龙网	29	9.40	30.9	0.27	6.27	32.2	-87.3
	6.00	21	涤纶网	20	4.70	42.6	0.20	2.51	20.3	-185
		14	涤纶网	26	5.80	34.5	0.82	0.93	20.6	-179
		11	涤纶网	30	6.60	30.3	0.73	0.94	20.5	-183

*多层隔热材料的总层数按反射屏、间隔物总数的一半计。

图2示出了双面镀金聚酰亚胺薄膜——涤纶网多层隔热材料的当量热导率随层密度的变化曲线^[4]。

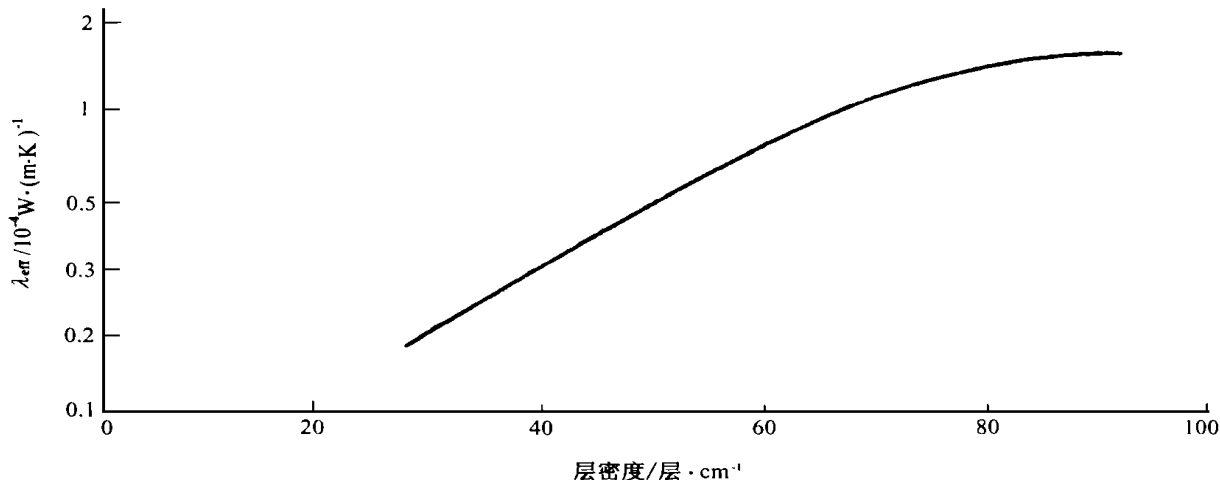


图2 双面镀金聚酰亚胺薄膜——涤纶网多层隔热材料的当量热导率随层密度的变化曲线

Fig.2 Equivalent thermal conductivity λ_{eq} vs. the number of radiation shields per unit thickness N/t for double-goldized kapton dacron

试件由 10 层反射屏和 10 层间隔物组成,反射屏为厚 $6.35 \mu\text{m} \sim 8.13 \mu\text{m}$ 的双面镀金聚酰亚胺薄膜,间隔物为厚 $167 \mu\text{m}$ 的涤纶网,试件不加压厚度为 0.386 cm ,热面温度为 288 K ,冷面温度为 77.5 K ,试验压力小于 $1.3 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ 。

5.4 双面镀铝聚脂薄膜——泡沫塑料多层隔热材料的性能

表 5 列出了由双面镀铝聚脂薄膜和泡沫塑料组成的多层隔热材料的性能。

表 5 双面镀铝聚脂薄膜——泡沫塑料多层隔热材料的性能
Tab. 5 Insulation performance of double-aluminized mylar-foam MLI

反射屏		间隔物		多层隔热材料			试验温度/		预处理		
材料	厚度/ μm	层数	材料	厚度/ μm	层数	总厚度/ mm	层密度/ $\text{层} \cdot \text{cm}^{-1}$	当量热导率/ $10^{-4} \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$		T_H	T_C
双面 镀铝 聚脂 薄膜	6.40	22	泡 沫 塑 料	762	22	25.4	8.66	1.41	16.1	10.2	未
								1.95	25.6	19.2	经
								2.15	27.2	21.7	预
								2.44	43.5	38.0	处
								5.33	70.6	65.4	理
								0.88	24.7	-12.5	93
								1.05	26.7	21.3	除
								1.66	58.4	52.2	气
								3.19	82.7	75.0	处
								5.21	95.1	89.5	理

由表可见,这类多层隔热材料也具有较好的隔热性能,但随着热面温度的升高,其隔热性能发生明显的下降。而采用加热除气处理,可使其隔热性能提高一倍以上。

图 3 示出双面镀铝聚脂薄膜和泡沫塑料组成多层隔热材料,其当量热导率随层密度变化的曲线^[4]。

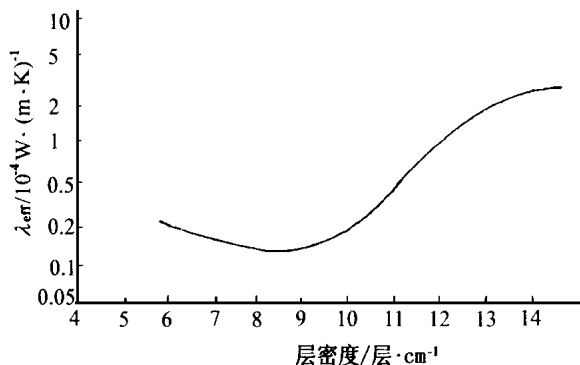


图 3 双面镀铝聚脂薄膜——泡沫塑料多层隔热材料的当量热导率随层密度变化的曲线

Fig. 3 Equivalent thermal conductivity λ_{eq} vs. the number of radiation shields per unit thickness N/t for double-aluminized mylar foam

试件是由 10 层反射屏和 11 层间的隔物组成。反射屏为双面镀铝聚脂薄膜,间隔物为厚 0.5 mm 的泡沫塑料,泡沫塑料采用氟里昂发泡,密度为 32 kg/m^3 ,试件不加压时厚度为 1.74 cm ,试验压力小于 $7 \times 10^{-3} \text{ Pa}$,其热面温度为 293 K ,冷面温度为 20.5 K 。

5.5 单面镀铝聚酰亚胺薄膜——硼硅玻璃纤维多层隔热材料的性能

图 4 示出了由单面镀铝聚酰亚胺薄膜和 Tissuglass 硼硅玻璃纤维组成的多层隔热材料,其当量热导率随层密度变化的曲线^[4]。

试件由 15 层反射屏和 16 层间隔物组成,反射屏是厚度为 $25.4 \mu\text{m}$ 的单面镀铝聚酰亚胺薄膜,间隔物为厚度 $15.2 \mu\text{m}$ 的 Tissuglass 硼硅玻璃。试件不加压的厚度为 0.64 cm ,试验压力小于 $6.7 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 。该多层隔热材料可在 250 K 以下的中温中使用。

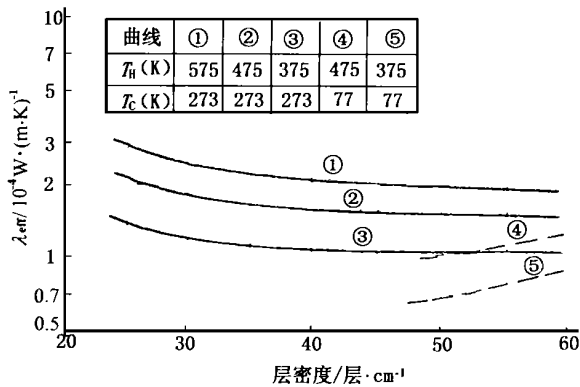


图4 单面镀铝聚酰亚胺薄膜—Tissuglass 硼硅玻璃多层隔热材料的当量热导率随层密度变化的曲线

Fig. 4 Equivalent thermal conductivity λ_{eq} vs. the number of radiation shields per unit thickness N/t for single-aluminized kapton tissuglass

5.6 高温多层隔热材料的组成和使用温度

表6列出了一些高温多层隔热材料的组成和最高使用温度。

表6 高温多层隔热材料的组成和使用温度

Tab. 6 Constitution and applied temperature of high temperature MLI

反射屏	间隔物	最高使用温度/
铝箔(6.35 μm)	玻璃纤维纸	480
铜箔(12.7 μm)	高硅氧纤维纸	535 ~ 815
镍箔(12.7 μm)	编织石英布	812 ~ 925
铝箔	编织石英布	1 425
铝箔	BN 纤维纸	1 645

6 多层隔热材料的应用

6.1 真空度的影响

在多层隔热材料应用时,首先要注意应用环境的真空度。不同的真空度,多层隔热材料往往具有不同的隔热性能,甚至可以相差很大。

真空度主要影响多层隔热材料层间气体的对流传热和导热,随着真空度的提高,层间气体的对流传热和导热逐渐减小,多层隔热材料的隔热性能也就逐渐提高。例如由双面镀铝聚酰亚胺薄膜和玻璃纤维纸组合而成的多层隔热材料,在 1.0×10^{-3} Pa 真空下,其当量热导率为 7.62×10^{-4} W/(m·K),而在大气条件下,其当量热导率为 4.98×10^{-2} W/(m·K),相差约二个数量级^[12]。

6.2 层密度的影响

多层隔热材料的隔热性能随着层密度具有明显的变化,这也是多层隔热材料的另一重要特征。

在多层隔热材料中,如果反射屏间完全没有接触,那么在真空条件下,它们之间的传热是靠辐射传热来进行的。所以层密度越大,单位厚度中反射屏的层数就越多,当量热导率就越小。这种情况只是理想的情况,而实际上,反射屏之间,或反射屏与间隔物之间是相互接触的,还同时存在着接触传热,接触传热量是随着层密度增加而迅速增加的。在层密度较小时,接触传热量所占的比例较小,所以层密度增加,引起辐射传热量减少的作用要大于层密度增加引起接触传热量增大的作用,即总传热量是减小的。所以开始时多层隔热材料的当量热导率是随着层密度增加而减小的;而当层密度较大时,层间接触传热量要比辐射传热量大很多,所以层密度增加引起辐射传热量减少的作用要小于层密度增加引起接触传热量增大的作用,即总传热量是增大的。所以层密度达一定程度后,多层隔热材料的当量热导率是随着层密度而增大的。所以为保证多层隔热材料的隔热性能,应严格控制层密度。

6.3 压缩负荷的影响

压缩负荷对多层隔热材料隔热性能的影响是通过层密度作用的。例如由10层双面镀金聚酰亚胺薄膜和涤纶网组成的多层隔热材料,随着压缩负荷由0.32 Pa增大到828 Pa,层密度也由25.9层/cm增大到91.5层/cm,而当量热导率则由 1.49×10^{-5} W/(m·K)增大到 1.26×10^{-4} W/(m·K),几乎增大了一个数量级。

6.4 打孔^[13]

由于气体导热的影响,在大气或低真空下,多层隔热材料的性能要大大低于高真空度下的性能。而卫星从地面到空间轨道,多层隔热材料所处的环境是一个从大气到高真空的渐变过程。为尽快地使多层隔热材料放气,以达到稳定的性能,采取打孔的办法是比较有效的。例如直径为0.8 mm,中心距为6 mm的小孔。

6.5 应用实例^[14,15]

多层隔热材料的应用实例见表7。

表 7 多层隔热材料的应用实例

Tab.7 Application samples of MLI

卫星	应用部位	作用	组成
东方红二号	仪器盘柱段和锥段两侧	减小仪器盘与外界环境的热耦合	双面镀铝聚脂薄膜—涤纶网
	远地点发动机	点火前保温, 点火后隔热	双面镀铝聚酰亚胺薄膜以及双面镀铝聚脂薄膜—涤纶网
	隔热屏	点火前保温, 点火后隔热	不锈钢箔—高硅氧布—镍箔
实践四号	舱内壁	减小舱内与舱外环境的热耦合	双面镀铝聚脂薄膜—涤纶网

参考文献

- 1 闵桂荣. 卫星热控制技术. 宇航出版社, 1991:175
- 2 闵桂荣, 郭舜. 航天器热控制. 科学出版社, 1998:110
- 3 郭舜. 多层隔热系统. 国外空间技术, 1980;增刊 1:1
- 4 Spacecraft thermal control design data. NASA N76 — II: 20 203 ~ 20 206
- 5 Keller C W. Thermal performance of multilayer insulations. NASA N74 —22 564
- 6 Scollon T R. Long high reliability thermal control systems study data handbook. NASA N72 —28 913
- 7 马庆芳, 方荣生等. 几种无间隔层多层隔热系统性能研究的测定. 见: 第三届空间热物理会议文集详细摘要, 1982:113
- 8 中国科学院上海有机化学研究所 601 组. 见: 第一颗人造卫星热辐射绝热材料研究报告. 见: 第一届空间热物理会议文集详细摘要, 1974:56
- 9 过九(金容), 何知朱. 多层隔热材料的研究. 见: 第一届空间热物理会议文集详细摘要, 1974:59
- 10 沈琮. 多层绝热试验研究. 见: 第二届空间热物理会议文集详细摘要, 1978:135
- 11 江经善, 张世伶. 多层隔热材料的性能研究. 中国空间科学技术, 1988;(1):64
- 12 彭芝生. 温控材料之二: 隔热及其它材料. 航天飞行器材料汇编, 1984:84
- 13 David G Gilmre. Satellite Thermal Control Handbook. 1994:4 ~ 62
- 14 过九(金容), 胡金刚, 李万林, 江经善等. 自旋稳定静止卫星热设计概况. 见: 第三届空间热物理会议文集详细摘要, 1982:1
- 15 江经善. 实践四号卫星热设计及其实施. 航天器工程, 1995;4(2):46

高效率压电式超声波搪锡机

本成果研制的超声波搪锡机, 已应用于导弹上的仪器和地面设备的电子器件的电装中。它是以锆钛酸铝压电陶瓷作换能元件。该压电换能器的机电耦合系数比铁镍合金换能器的机电耦合系数高 2~3 倍, 搪锡质量高, 使用寿命长, 可替代进口镍片。声头结构设计采用凸面声头座, 导电片用薄金属片, 可减少超声能量损耗, 降低噪声。用 5 个 150 W 内热式电烙铁芯置于锡锅内, 可节省电力 50% 以上。该机性能稳定, 经济效益明显。

· 李连清 ·