

具有多层反射结构的柔性纳米隔热材料

吴文军 胡子君 房景臣 孙陈诚 张宏波

(航天材料及工艺研究所先进功能复合材料技术国防科技重点实验室,北京 100076)

文 摘 将纳米多孔结构和多层反射屏引入柔性隔热毡中,设计出一种具有多层反射结构的柔性纳米隔热材料,并结合材料的微观结构对其隔热机理进行了分析。结果表明:多层反射屏抑制了材料的红外辐射传热量,纳米多孔结构降低了气体导热和对流传热,有效地提高了材料的隔热性能。

关键词 多层反射,纳米结构,隔热机理

Flexible Thermal Insulating Material With Multilayer Reflection and Nanostructure

Wu Wenjun Hu Zijun Fang Jingchen Sun Chencheng Zhang Hongbo

(National Key Laboratory of Advanced Functional Composite Materials Technology,
Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract Flexible thermal insulating materials with multi-layered nanostructure were fabricated by introducing the nanoporous colloid silica and multi-layer reflection foil into the ceramic fiber blanket. The insulation mechanism was analyzed based on the microstructure of the resulted material. The results indicate that the radiative heat transfer is blocked by multilayer reflection foil, the heat conduction and convection of gas are decreased by nanoporous structure. Thus, thermal insulation performance of the composite is improved.

Key words Multilayer reflection, Nanostructure, Insulation mechanism

1 引言

可重复使用航天飞行器(RLV)再入大气层时经受长时间的剧烈气动加热,必须采用热防护系统(TPS)对飞行器加以保护,飞行器隔热层的合理设计是重复使用运载器的关键技术之一。柔性隔热结构没有热匹配问题,可减少制造和安装方面的复杂性,能制成较大尺寸直接用胶黏剂粘接到蒙皮上,并具有质量轻、耐热震性好及价格便宜的优点^[1]。因此柔性热防护系统广泛应用于RLV中的较低温区,约占防热面积的30%,在整个TPS中起着至关重要的作用^[2]。本文将纳米结构和多层反射屏引入柔性热防护系统中,设计出一种具有多层反射结构的柔性纳米隔热材料,并进行了一定的优化实验,从微观结构上对其隔热机理进行了分析。

2 实验

2.1 试样的制备

复合材料中柔性纳米结构采用陶瓷纤维增强的金属氧化物柔性气凝胶材料,以高反射金属箔作为反

射屏,组合制得具有多层反射结构的柔性纳米隔热材料。

2.2 测试仪器

(1)隔热材料背面温升测试采用石英灯背面温升试验装置。试样放在测试部位,热面快速升至600℃,并保持30 min,测量冷面不同点的温度随时间的变化,典型的加热面载荷温升曲线如图1所示。

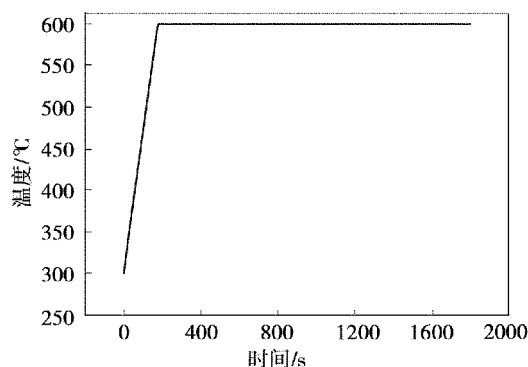


图1 正面加载温度曲线

Fig.1 Temperature load curve of face side

收稿日期:2008-09-30;修回日期:2009-02-06

作者简介:吴文军,1981年出生,硕士,工程师,主要从事高效隔热复合材料方面的研究。E-mail:evanwu@163.com

(2)采用德国 Leica S440 型扫描电子显微镜观察材料的微观结构。

3 结果与讨论

绝大部分绝热材料的传热主要由以下三个部分构成:气体分子的热传导(Q_g)、固体材料的热传导(Q_s)、红外辐射传热(Q_r)。因此,总传热量 $Q = Q_g + Q_s + Q_r$,总的表观热导率 $\lambda = \lambda_g + \lambda_s + \lambda_r$ 。

为了降低绝热材料的热导率,需从以上三个方面进行设计。本文所设计的具有多层反射结构的柔性纳米隔热材料结构示意图由图 2 所示。

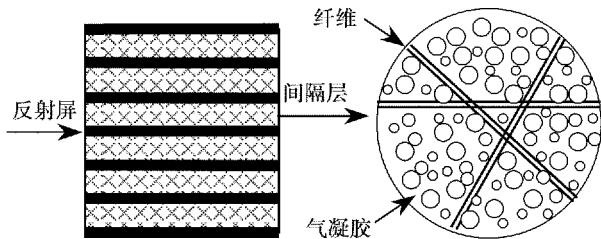


图 2 复合材料结构示意图

Fig. 2 Sketch map of composites structure

3.1 多层反射结构对隔热性能的影响

绝大多数传统绝热材料均对红外光具有良好的透明性,当冷、热面温差在 100°C 以上时,这种传热将占主导地位。而且随着温度的提高,这种趋势更为显著(根据玻耳兹曼定律, Q_r 随温度的四次方增长),因此绝大多数绝热材料的热导率—温度曲线随着温差的升高,曲线斜率愈来愈陡^[3]。所以,如果能够有效地减少隔热材料的 Q_r ,就可以大大降低隔热材料的高温热导率,提高隔热性能。而多层反射隔热组合结构就能够有效地抑制热辐射的传递,其原理如图 3 所示。

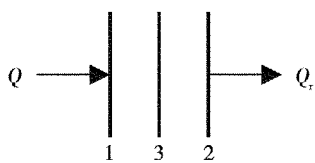


图 3 多层反射隔热材料隔热原理

Fig. 3 Heat insulating principle of multi-layer thermal insulations

两个间距尺寸比长宽尺寸小很多的相同平行反射屏 1 和 2,且他们具有相同的灰体的性质并处于真空状态,他们之间的辐射传热量 Q_r 为:

$$Q_r = \frac{\sigma A(T_1^4 - T_2^4)}{(2/\varepsilon) - 1} \quad (1)$$

式中, σ 为斯狄芬—玻耳兹曼常数, A 为反射屏 1 或 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 分别为反射屏 1 和 2 的发射率。若在 1 和 2 之间放置同样的一个隔热屏 3,则通过隔热材料的辐射能量可以减小 50% [式(2)]。

宇航材料工艺 2009 年 第 5 期

$$Q_r = \frac{\sigma A(T_1^4 - T_2^4)}{2[(2/\varepsilon) - 1]} \quad (2)$$

如果放置 n 个大小相等材料相同的平面,则辐射的热量可以减小至原来的 $1/(n+1)$ [式(3)],这就是加入金属反射层可以大大降低辐射传热的理论基础^[4~5]。

$$Q_r = \frac{\sigma A(T_1^4 - T_2^4)}{(n+1)[(2/\varepsilon) - 1]} \quad (3)$$

Kamran 认为最适合的反射屏间距为 2 mm ^[6],国外 TPS 高温多层隔热结构通常在每厘米的厚度内放置 2~3 层反射屏。本文亦将多层反射屏间纤维间隔物的厚度定为 2 mm ,制备总厚度为 25 mm 的复合材料,将其背温曲线与不含多层反射结构的材料(厚度亦为 25 mm)进行对比,结果如图 4 所示。

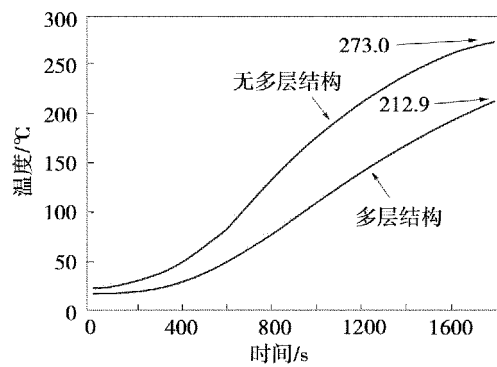


图 4 多层反射结构对材料隔热性能的影响

Fig. 4 Influence of multi-layer structure on insulation performance

结果表明,多层反射结构的引入有效地减少了复合材料的 Q_r ,在正面温度为 600°C 且保持 30 min 的情况下,使其背面温度降低了 22%,提高了材料的隔热性能。

3.2 纳米结构对隔热性能的影响

复合材料中多层反射屏之间的间隔物为陶瓷纤维增强的金属氧化物柔性气凝胶材料(图 2)。通常,气体分子的平均自由程长度均在纳米级范围内,且随着温度的升高而增大。二氧化硅微粒构架成的微孔尺寸均小于这一临界尺寸,气体分子的热传导得到了抑制。同样,在如此小的微孔尺寸下,气体无法进行对流传热^[3]。而二氧化硅气凝胶具有极低的热导率,因此纳米二氧化硅气凝胶结构的引入,在微量增加固体热传导的同时有效地抑制了气体分子的热传导和对流传热。

通过改变柔性气凝胶制备过程中的化学组成和工艺参数,获得了六种柔性纳米隔热材料,各试样具体情况如表 1 所示。

表1 几种柔性隔热材料的石英灯背面温升试验结果

Tab.1 Test results of insulation performance of several composites

材料	密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	背面温度/ $^{\circ}\text{C}$
0 [#]	0.215	285.3
1 [#]	0.266	231.9
2 [#]	0.259	237.0
3 [#]	0.231	276.0
4 [#]	0.259	212.9
5 [#]	0.247	263.5

注1): 为陶瓷纤维毡材料,未复合柔性气凝胶。

表1表明,不同工艺参数下获得的纳米气凝胶复合材料都能够降低复合材料的背温。图5所示相应的复合材料微观结构能够很好地解释这一现象。从图5可以看出,4[#]材料最密实,未出现明显的裂纹和

缺陷,其它四种材料不同程度地存在缺陷。从传热学角度考虑,裂纹和缺陷都是气体热传导的通路,尽管缺陷和裂纹的尺寸不足以引起对流传热,但是气体热传导(相对于纳米隔热材料,静止空气的热导率也非常显著)的影响已经足以导致这几种材料的隔热性能表现出显著的差别。因此,材料的背温并非与其密度和制备时的工艺参数具有对应关系,而是与材料的微观结构密切相关。4[#]试样对气体分子的热传导和对流传热抑制作用最明显,同时,由于气凝胶本身的热导率极低,其对固体热传导的增加几乎可以忽略。这就是4[#]材料能够最大程度降低材料背温的原因,这与上文的理论分析相一致。

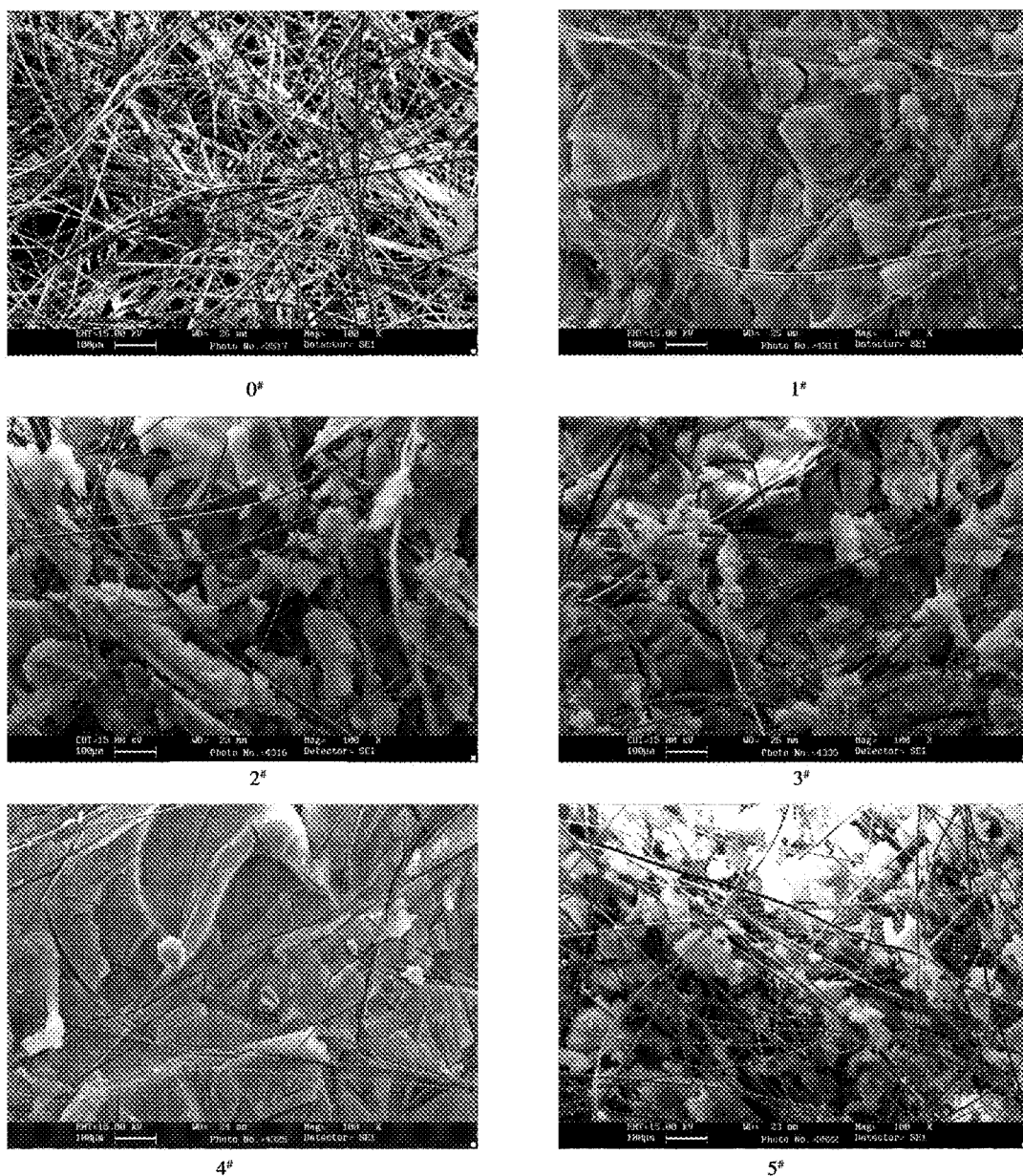


图5 扫描电镜图谱

Fig.5 SEM images of different composites

(下转第55页)