

轻质烧蚀耐热材料结构组成对烧蚀形貌的影响

梁馨 方洲 林治峰 乔鹏 代晓伟

(航天材料及工艺研究所, 北京 100076)

文 摘 采用石英灯烧蚀试验对研制的一种轻质烧蚀耐热材料在不同耐热结构下的烧蚀形貌和隔热性能进行了研究。结果表明:不同的耐热结构形式,轻质烧蚀耐热材料的烧蚀形貌不同,耐热结构的纵向温度梯度和面内温度梯度均影响轻质耐热材料的烧蚀形貌,温度梯度越小,热量在材料表面积聚越严重,因此表面碳化特征越明显。在不同材料的面内组合状态下,轻质烧蚀耐热材料可实现与较高密度材料的匹配烧蚀,说明其烧蚀耐热效率较高。在耐热结构设计时,可综合考虑其面密度和烧蚀形貌,合理利用耐热结构组成,实现高效防隔热和轻量化设计。

关键词 耐热材料,烧蚀形貌,温度梯度,碳化

中图分类号:TB33

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2021.04.013

Ablation Morphology of the Low Density Thermal Protection Materials on Different Combination of Thermal Protection Structure

LIANG Xin FANG Zhou LIN Zhifeng QIAO Peng DAI Xiaowei

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract The ablation morphology and insulation properties of the low density thermal protection material on different combination of thermal protection structure were investigated by quartz lamp ablation experiments. It is shown that the morphology is different with thermal protection structure. The morphology is effected by the temperature gradient for longitudinal direction and in-plane direction of the thermal protection structure. The less temperature gradient, the more heat accumulated on the ablation surface, and the more obvious of the carbonization characteristic. The ablation matching is realized between the low density ablation material and higher density material for the combination of in-plane direction. It is revealed that the ablation efficiency and the thermal protection efficiency is higher. The areal density and ablation morphology can be considered for the design of the thermal protection structure. The high efficiency thermal protection and insulation and lightweight design can be achieved by rational utilization of thermal protection structure.

Key words Thermal protection material, Ablation morphology, Temperature gradient, Carbonization

0 引言

飞行器在高速飞行过程中,由于与大气的相互作用,将产生温度很高的气动加热,若无热防护,则飞行器将会被高温烧毁,因此耐热材料技术是保证飞行器内部温度在一定范围内的重要技术之一,从而保证其内部仪器设备等正常工作,实现其预定功能。由于飞行器的质量有一定限制,所以耐热材料及结构若能实现减重,则可提高飞行器的有效载荷,因此轻质烧蚀耐热材料是耐热材料发展的一个重要

方向。烧蚀耐热材料的外部烧蚀温度随着气动加热不同而不同,而内部温度随用途不同而不同,如载人飞船,内部温度不可超过人体承受范围,如其他飞行器,则温度不能超过设备运行的上限或耐热结构界面的使用上限温度。因此耐热材料在厚度上存在一定的温度梯度,该温度梯度对轻质烧蚀耐热材料的烧蚀碳层形貌的影响研究可为耐热设计提供依据。

蜂窝增强耐热材料是耐热材料的一个重要分支,目前蜂窝增强轻质耐热材料是国内外应用最为广泛的

收稿日期:2021-05-27

第一作者简介:梁馨,1979年出生,博士,研究员,主要从事树脂基功能及结构复合材料研究工作。E-mail:13810171997@139.com

一种轻质隔热材料,具有相当高的可靠性和质量一致性。国外大部分空间探测器均采用这种类型的轻质隔热材料,包括近地轨道探测器和月地轨道探测器^[1-5],国内的神舟飞船返回舱^[6]、嫦娥五号返回器^[7]等也均采用了这类轻质隔热材料。该类隔热材料可调控手段及技术途径较为广泛,可实现较优的烧蚀防隔热性能,具有广阔的应用前景。本文主要针对蜂窝增强轻质隔热材料的结构组成对烧蚀形貌的影响进行相应研究。

1 实验

1.1 原材料

轻质烧蚀隔热材料A(蜂窝增强低密度烧蚀隔热材料)、密度约为 0.5 g/cm^3 ,自行研制;烧蚀隔热材料B(玻璃钢烧蚀结构材料),密度约为 1.0 g/cm^3 ,自行研制;夹层材料C(玻璃钢蜂窝夹层结构,厚度 15 mm),自行研制;面板D(玻璃钢面板,厚度 2 mm),自行研制。

1.2 测试方法

1.2.1 不同隔热材料厚度对烧蚀形貌的影响

采用不同厚度材料A和C进行粘接组合,其中材料A的厚度分别为 20 、 15 、 13 mm ,采用石英灯试验进行烧蚀考核(600 kW/m^2 ,时间 210 s),同时测量材料A与C的界面温升和背面温升(图1),对比材料A表面烧蚀形貌的不同。

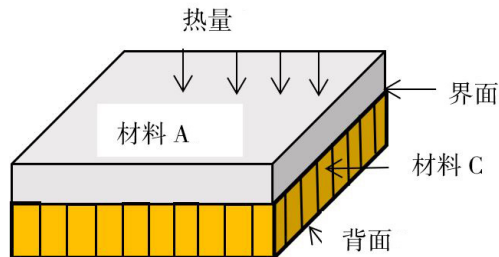


图1 材料A与材料C组合示意图

Fig. 1 Schematic diagram of combination of material A and C

1.2.2 不同隔热结构对烧蚀形貌的影响

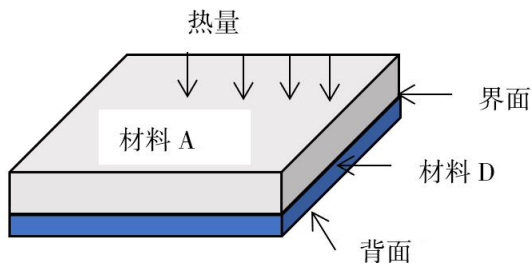


图2 材料A与材料D组合示意图

Fig. 2 Schematic diagram of combination of material A and D

采用 13 mm 的材料A与D进行粘接组合,采用同样的石英灯试验进行烧蚀考核,测量材料A与D的界面温升和背面温升(图2),对比材料A表面烧蚀形貌的不同。

1.2.3 不同烧蚀材料面内组合对烧蚀形貌的影响

材料A与B进行面内组合,再与材料C进行粘接组合(图3),采用相同的石英灯烧蚀考核条件进行试验,对比材料A的表面烧蚀形貌与单独材料A与C组合的烧蚀形貌的不同。

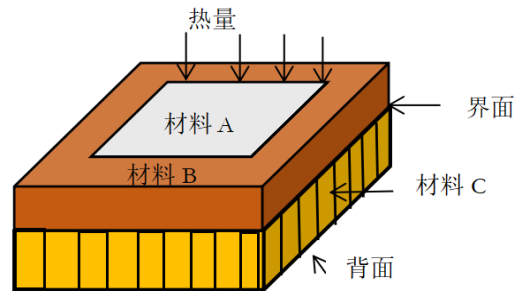


图3 材料A与材料B组合示意图

Fig. 3 Schematic diagram of combination of material A and B

1.2.4 材料性能测试

采用GB/T1463—2005对材料A、B进行密度测试;采用GB/T10294—2008和GB/T10295—2008分别对材料A、B进行热导率测试;采用GJB330A—2000测量材料A、B的比热容。

2 分析与讨论

2.1 轻质隔热材料厚度对烧蚀形貌的影响

在石英灯烧蚀试验考核状态下,图1所示的隔热结构的试验结果如表1所示。

表1 不同材料厚度组合方式及温度测量结果

Tab. 1 The combination of different material thickness and results of temperature

试样	材料	厚度/ mm	组合材 料	停车时界面 温升/ $^{\circ}\text{C}$	停车时背面 温升/ $^{\circ}\text{C}$	面密度 $/\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$
1 [#]	A	20	C	17.3	9.2	1.549
2 [#]	A	15	C	103.5	17.4	1.252
3 [#]	A	13	C	282	47.2	1.183

在相同的材料组合、不同烧蚀材料厚度的情况下,界面温升及背面温升随时间的变化趋势相同,如图4所示。材料厚度越薄,界面温升越大,背面温升越大,这与材料烧蚀反应机理相吻合。在外界热量作用的情况下,材料发生物理化学反应,一部分热量被物理化学反应所消耗,另一部分热量则由材料表面不断向材料内部传递,材料内部温度逐渐升高,距离加热面越近,温度越高,即材料A厚度越薄,温升越大。

从图4可见在材料厚度方向上,材料厚度对温升的影响非常显著,材料越薄,温升越大,材料厚度相差 2 mm (15 和 13 mm)时,停车时界面温升相差 $178.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,这与材料密度较低,隔热性能较好有关。

图5为不同材料厚度组合的隔热材料烧蚀形貌,

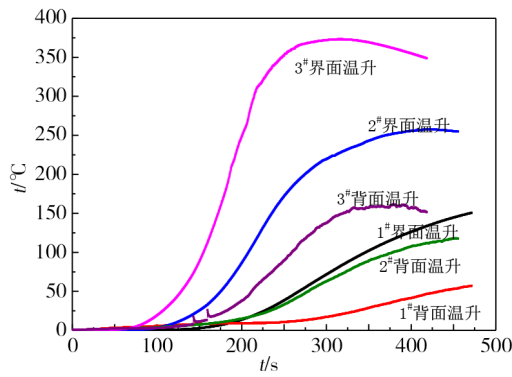
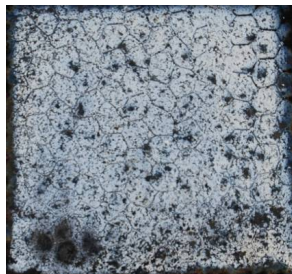


图4 不同材料厚度组合温升曲线

Fig. 4 The elevated temperature curves of combination of different material thickness



(a) 1#: A(20 mm)+C



(b) 2#: A(15 mm)+C



(c) 3#: A(13 mm)+C

图5 不同材料厚度组合的防热材料烧蚀形貌

Fig. 5 The ablation morphologies of the ablation materials of different thickness

随着烧蚀材料厚度减少,界面温升越高,材料表面烧蚀膨胀越少,以硅基材料裂解为主的产物特征越来越不明显,当材料A厚度为13 mm时,出现了明显的碳化现象,可见界面温升越高,即防热材料厚度方向上的温度梯度越小,热量向材料内部传递的动力越小,从而在表面积聚的趋势越明显,导致材料表面碳化程度越严重。

2.2 不同隔热结构对烧蚀形貌的影响

相同的烧蚀材料厚度,不同隔热结构的温升变化如表2所示。当背面材料隔热性能越好(如材料C)时,界面温升越高,背面温升越小,反之,背面材料隔热性能越差(如材料D),界面温升越小,背面温升越高,如图6所示。热量从烧蚀材料表面传向材料A内部,再通过界面传至背面材料C或者D,C的隔热性能好,则热量继续传向背面的速度大大减慢,因此热量积聚在界面处,导致背面温升较低;而D的传热性能好,则热量快速传至背面,所以界面温升小,背面温升大。

表2 不同隔热结构组合及温度测量结果

Tab. 2 The combination of different thermal protection structure and results of temperature

试样	材料	厚度/mm	组合材料	停车时界面温升/°C	停车时背面温升/°C	面密度/g·cm ⁻²
3#	A	13	C	282	47.2	1.183
4#	A	13	D	172.5	113.9	1.156

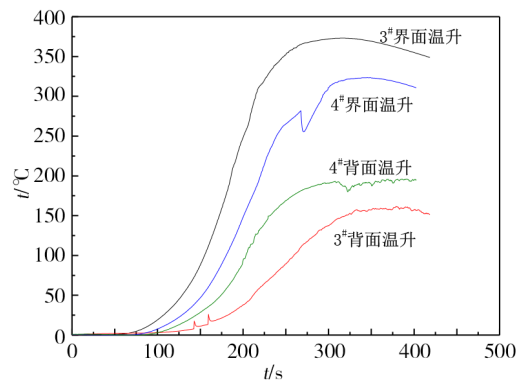
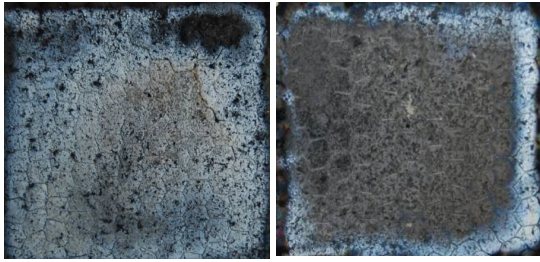


图6 不同隔热结构组合温升曲线

Fig. 6 The elevated temperature curves of combination of different combination of thermal protection structure

图7为不同隔热结构组合的防热材料烧蚀形貌,可见虽然3#的界面温升高于4#,但随着背面温升的升高,4#材料A呈现出典型的表面碳化特征,材料表面几乎全部碳化(边缘效应除外),结合表2数据,可知随着背面温升升高,轻质烧蚀材料的碳化现象越明显,由此说明在界面处连接方式可承受界面温度的情况下,防热材料与背面材料可视为一个整体,纵向传热是在该整体结构上进行的,而非单一的防热材料自身,防热材料与背面材料组合而成的防热结构是影响烧蚀材料表面形貌的一个因素。除此以外,其组合方式还影响了防热结构的质量,从表2可知,3#面密度最小,同时其表面烧蚀形貌以碳化为主,碳层更加致密坚硬,在某些特定热环境下,具有良好的隔热、耐烧蚀和轻量化特征,可作为防热结构设计的一个较好选择。



(a) 3#:A(13 mm)+C (b) 4#:A(13 mm)+D

图7 不同隔热结构组合的隔热材料烧蚀形貌

Fig. 7 The ablation morphology of the different combination of thermal protection structure

2.3 不同材料面内组合对烧蚀形貌的影响

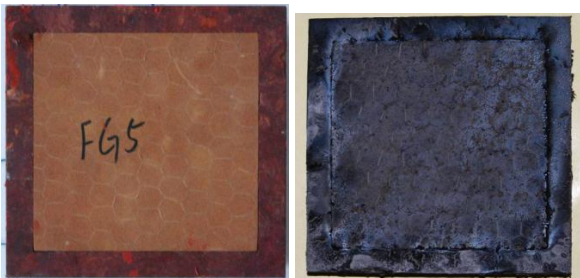
材料A和B的热物理性能如表3所示,A和B是热导率相差较大的两种材料,将材料A和B进行面内组合,同时与C材料组成隔热结构,采用同样的石英灯烧蚀条件进行考核试验,其烧蚀形貌如图8所示。

表3 材料热物理性能

Tab. 3 The thermophysical properties of material A and B

材料	密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	比热容 $/\text{J}\cdot(\text{g}\cdot\text{K})^{-1}$	热导率 $/\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$
A	0.5	1.10	0.115
B	1.0	1.15	0.22

可见,材料A的烧蚀形貌发生了明显的碳化(与3#不同),由此说明在面内方向,两种不同材料之间存在一定的热量传递和重新分布。材料B成分热解组分相对较少,在烧蚀中的物理化学反应也相对较少,因此在相同的气动加热条件下,其表面温度相对较高^[8],而材料A则由于复杂的化学反应使得表面温度相对较低,因此A、B材料在面内形成了温度梯度。在此温度梯度作用下,热量从B传递至A,使得A的碳化趋势更加明显。在图8中可见,虽然材料A和B的密度差异较大,但二者在本试验条件下,烧蚀后退一致,未出现宏观的烧蚀台阶或烧蚀形貌不匹配,说明轻质隔热材料A具有良好的烧蚀性能和隔热性能,其隔热效率较高,在实际应用中有广泛的前景。



(a) 烧蚀前 (b) 烧蚀后

图8 5#隔热结构烧蚀前后形貌

Fig. 8 The morphologies of 5# combination of thermal protection structure before and after ablation

3 结论

(1) 隔热结构的纵向温度梯度和面内温度梯度均影响轻质隔热材料的烧蚀形貌,温度梯度越小,表面碳化特征越明显。

(2) 轻质烧蚀隔热材料可实现与较高密度材料的匹配烧蚀,其烧蚀隔热效率较高。

(3) 合理考虑隔热结构组成,可实现有效的高效防隔热和轻量化设计。

参考文献

- [1] DONALD M C. Thermal protection systems manned spacecraft flight experience[R]. N93-12449, NASA, Oct 1992.
- [2] GRAVES R A, WITTTE W G. Flight-test analysis of Apollo heat-shield material using the pacemaker vehicle system [R]. NASA-TN-D-4713, NASA, August 1968.
- [3] ACROUCH R K, WALBERG G D. Investigation of ablation behavior of Avcoat 5026 39M over a wide range of thermal environment [R]. NASA-TM-X-1778 69N22933, NASA, April 1969.
- [4] WILLCOCKSON H W. Mars pathfinder heatshield design and flight experience [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1999, 36(3):374-379.
- [5] JOHN K. Overview of the orion thermal protection system development [C]. 7th International Planetary Probe Workshop, June 16, 2010.
- [6] 王春明,梁馨,孙宝岗,等. 低密度烧蚀材料在神舟飞船上的应用[J]. 宇航材料工艺, 2011, 41(2): 6-8.
WANG C M, LIANG X, SUN B G, et al. Application of low density ablative material on shenzhou spacecraft [J]. Aerospace Materials & Technology, 2011, 41(2): 6-8.
- [7] 董彦芝,刘峰,杨昌昊,等. 探月工程三期月地高速再入返回飞行器隔热系统设计及验证[J]. 中国科学:技术科学, 2015, 45(2):151-159.
DONG Y Z, LIU F, YANG C H, et al. Design and verification of the TPS of the circumlunar free return and reentry flight vehicle for the 3rd phase of Chinese lunar exploration program[J]. Sci. Sin. Tech., 2015, 45(2): 151-159
- [8] 梁馨,谭朝元,罗丽娟,等. 低密度隔热材料烧蚀性能研究[J]. 载人航天, 2016, 22(3):298-301
LIANG X, TAN Z Y, LUO L J, et al. Research on ablation properties of low density thermal protection materials [J]. Manned Spaceflight, 2016, 22(3):298-301