

刚性隔热瓦重复使用性评价研究

杨海龙 周洁洁 姚先周 宋兆旭 胡子君

(航天材料及工艺研究所,先进功能复合材料技术重点实验室,北京 100076)

文 摘 为满足未来新型飞行器对隔热材料的需求,将刚性隔热瓦在 1 200℃ 热处理 30 min,对其质量稳定性、尺寸稳定性、力学性能、隔热性能以及微观结构等进行了评价。结果表明,热处理 20 次的质量损失率、 xy 向线性收缩率、隔热性能以及微观结构变化都很小,仅 z 向线性收缩率稍大(3.19%)。综合来看,1 200℃/30 min 的使用条件下,隔热瓦能够满足 20 次的重复使用要求。

关键词 刚性隔热瓦,重复使用性,热处理

中图分类号:TB321, TB34, TB35

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2014.05.014

Evaluation on Reusability of Ceramic Fiber Rigid Insulation Tiles

YANG Hailong ZHOU Jiejie YAO Xianzhou SONG Zhaoxu HU Zijun

(Science and Technology on Advanced Functional Composites Laboratory, Aerospace Research

Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract In order to meet the needs of new flight vehicles in future, the ceramic fiber rigid insulation tiles were heat-treated at 1 200℃ for 30 min, and the mass loss, the linear shrinkage rate along xy and z directions, the thermal insulation performance and the microstructure of it were investigated. The results indicate that the variations of that performance are very small except the linear shrinkage rate along z direction (3.19%). Comprehensively considering all performance of the rigid insulation tiles, the reusability of it can reach up to 20 times.

Key words Rigid Insulation Tiles, Reusability, Heat treatment

0 引言

重复使用运载飞行器(RLV)是一种降低运输费用、提高操作效率的有效途径^[1-2]。热防护系统作为 RLV 的关键技术之一,它的可重复使用性直接关系到运输费用及其操作效率的高低。

刚性隔热瓦^[3-5]是飞行器热防护系统中隔热材料的典型代表,它由陶瓷纤维经高温烧结获得。1981年4月,世界上第一架航天飞机美国“哥伦比亚”号试飞成功,标志着作为航天飞机热防护系统主体的刚性隔热瓦防热结构获得巨大成功。在随后30年里,航天飞机迎风面大面积防热均采用了这种材料,至今已完成了130余次飞行任务。目前,刚性隔热瓦仍是美国高超声速飞行器大面积防热结构设计的重要材料方案。2004年11月,美国X-43A高超声速飞行器机身表面使用了带TUF1涂层的AETB隔热瓦,成功进行了最大飞行速度达10 Ma的演示验证飞行^[6]。据报道,美国2010年4月发射的X-37B轨道

试验飞行器的迎风面同样使用了最新研制的BRI刚性隔热瓦。

由于技术保密等原因,有关刚性隔热瓦重复使用性评价研究的国外资料相当少见,为此有必要进行此方面的探索,以便为未来飞行器的发展起到有效支撑作用。本文将隔热瓦进行1 200℃/30 min的循环热处理,获得了质量、尺寸稳定性以及力学性能、隔热性能和微观结构的变化规律,对其重复使用性进行了评价。

1 实验

将隔热瓦样件置于1 200℃的马弗炉中在空气气氛下进行热处理,热处理时间为30 min。热处理完毕后取出样件在室温下自然降温,降至室温后再进行下一次的热处理。每次热处理完毕并经降温后取样进行测试,包括质量损失率、线性收缩率、力学性能、隔热性能以及微观结构等。其中,质量损失率和线性收缩率分别反应了材料的质量和尺寸稳定性,定义如

收稿日期:2013-10-30

作者简介:杨海龙,1980年出生,高级工程师,主要从事隔热材料研究。E-mail:yhl20032003@126.com

下:

$$\text{质量损失率} = \frac{(\text{热处理前质量} - \text{热处理后质量})}{\text{热处理前质量}} \times 100\%$$

$$\text{线性收缩率} = \frac{(\text{热处理前尺寸} - \text{热处理后尺寸})}{\text{热处理前尺寸}} \times 100\%$$

此外,由于纤维在隔热瓦成型过程中倾向于一个方向分布,则其性能在平行与垂直纤维方向有所区别。文中将垂直于纤维的方向定义为 z 向,而平行于纤维的方向定义为 xy 向。

2 结果与讨论

2.1 质量和尺寸稳定性评价

图 1 所示的是隔热瓦质量损失率及线性收缩率随热处理次数的变化。可以看到,质量损失率和 xy 向线性收缩率都很小,并且随热处理次数的增加几乎没有变化,只有 z 向线性收缩率随热处理次数的增加而增大,热处理 20 次后达到 3.19%。

质量损失率与隔热瓦在热处理过程中发生的物理化学变化有关。由于隔热瓦的主要组分是高温下稳定性很高的陶瓷纤维,所以热处理过程中其质量没有变化,稳定性很好。

xy 向和 z 向的线性收缩率主要来源于高温热处理过程中纤维的收缩和纤维之间烧结“焊点”的变化。热处理过程中,陶瓷纤维的熔融或者晶相转变会引起纤维收缩。由图 2 中隔热瓦的 XRD 图谱以及图 3 其内部 SEM 照片可以看到,与热处理前相比,热处理后的晶相并未发生变化,且纤维没有产生熔融迹象,这正是 xy 向线性收缩率很小的原因。 z 向上,纤维呈现层状堆积,主要靠的是纤维之间烧结“焊点”

的支撑,随着热处理的进行,纤维之间的堆积更加紧密,因此收缩逐渐加大。

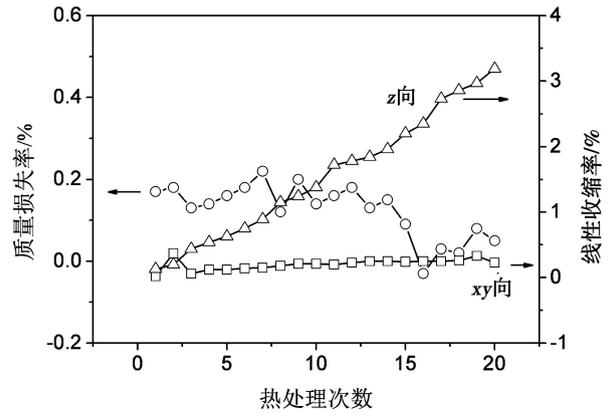


图 1 热处理次数对隔热瓦质量损失率和线性收缩率的影响

Fig. 1 Effect of heat treatment times on mass loss and linear shrinkage for rigid insulation tiles

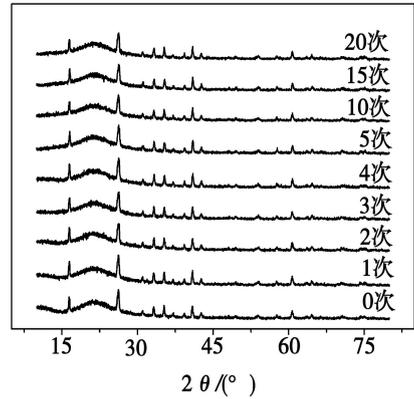
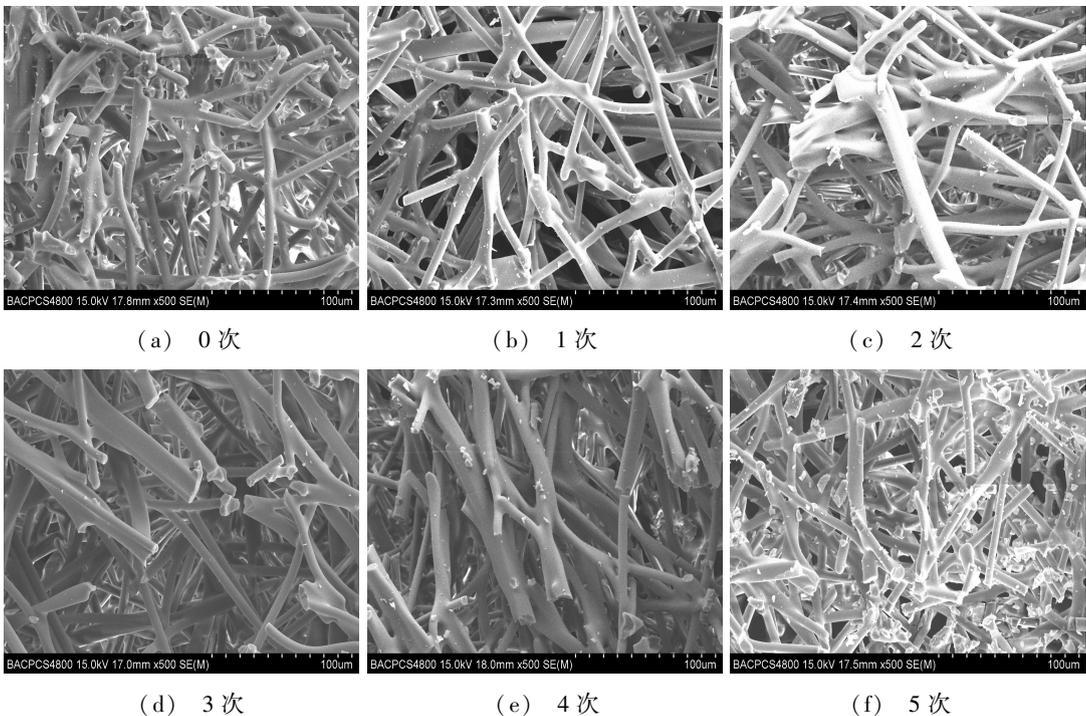


图 2 热处理次数对隔热瓦物相的影响

Fig. 2 Variation in phase compositions of rigid insulation tiles heat-treated for different times





(g) 10次

(h) 15次

(i) 20次

图3 不同热处理次数隔热瓦的内部SEM照片

Fig. 3 SEM photographs of rigid insulation tiles via heat treatment for different times

2.2 力学性能稳定性评价

图4给出了不同热处理次数后隔热瓦的力学性能(由于 xy 向拉伸强度较大,无合适测试方法进行试验)。可以看到:

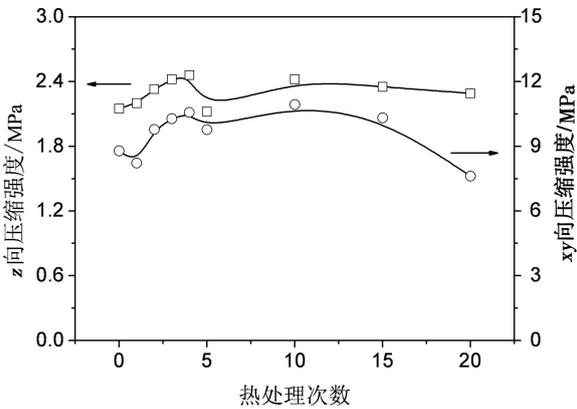
(1) z 向压缩强度先略有提高后略有降低,热处理5次后达到最大,但总体来说变化不大,说明热处理对 z 向压缩强度影响不大;

(2) xy 向压缩强度先提高后有所降低,总体来看变化不大;

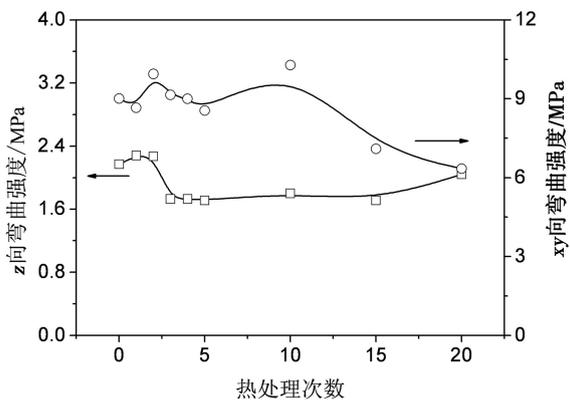
(3) z 向弯曲强度变化不大,仅在热处理超过3次后略有降低;

(4) xy 向弯曲强度变化不大,整体上来说仅在热处理超过10次后略有降低;

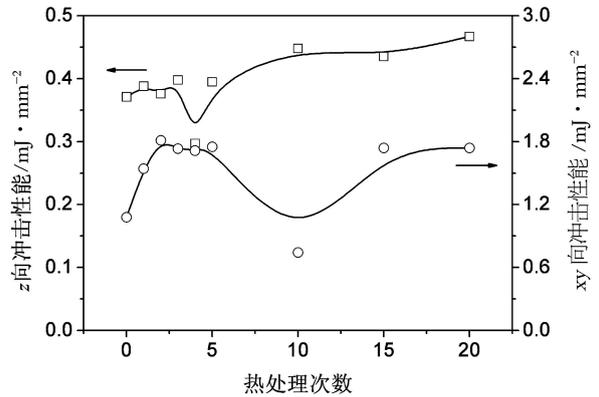
(5) z 向冲击性能整体上来说略有提高;



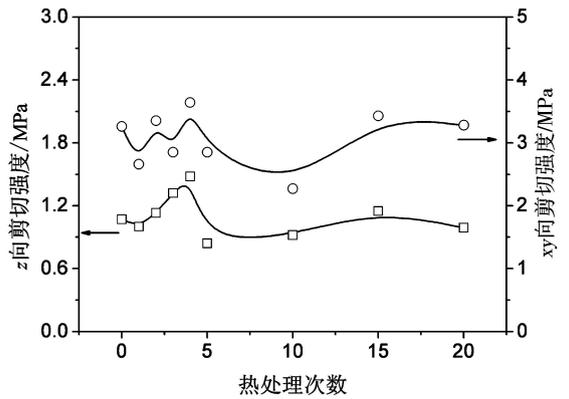
(a) 压缩强度



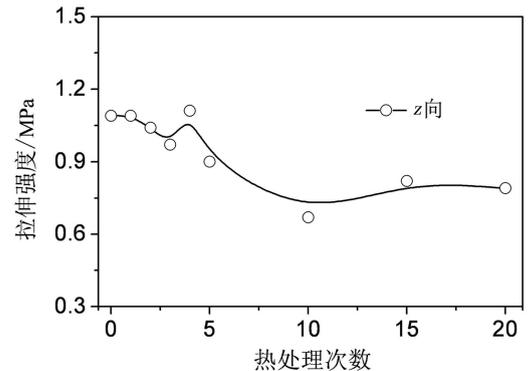
(b) 弯曲强度



(c) 冲击性能



(d) 剪切强度



(e) 拉伸强度

图4 热处理次数对隔热瓦热力学性能的影响

Fig. 4 Influence of heat treatment times on mechanical properties for rigid insulation tiles

(6) xy 向冲击性能在热处理1次和2次后逐渐

提高,但热处理超过 2 次后基本无变化;

(7) z 向剪切强度先提高后略有降低;

(8) xy 向剪切强度先提高后略有降低;

(9) z 向拉伸强度整体上呈现逐渐降低趋势,但变化较小。

理论上讲,隔热瓦的烧结程度会随着热处理次数的增加而提高,即纤维搭接处的“焊点”会有所增强,这样隔热瓦的力学性能会有所提高。同时,隔热瓦的骨架—陶瓷纤维内部结构会随着热处理的进行可能会有所变化,即出现原子结构重排、结晶甚至晶相转变等倾向,这种转变会导致纤维内部出现晶界或者晶界变化等,因此纤维内部会由此出现微裂纹,成为纤维力学性能的“薄弱点”。因此,两方面的影响均存在,主要看哪方面占据主导,由前面的 XRD 图谱可知,纤维未发生晶相转变,所以热处理 20 次后对隔热瓦的力学性能影响不大。综合各项力学性能来看,20 次的重复使用性能很好。

2.3 隔热性能评价

不同次数热处理后的隔热瓦室温热导率如图 5 所示,最大值和最小值之间仅相差 5 $\text{mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$,因此热处理对隔热瓦的隔热性能没有影响。

隔热瓦的隔热性能主要取决于隔热瓦的纤维组成和密度。热处理前后,纤维晶相变化不明显,可由 XRD 图谱看到,因此纤维本身的热导率不会发生改变,而热处理后隔热瓦的线性收缩率很小,意味着密度变化也很小。所以,隔热瓦的隔热性能不会发生改变。

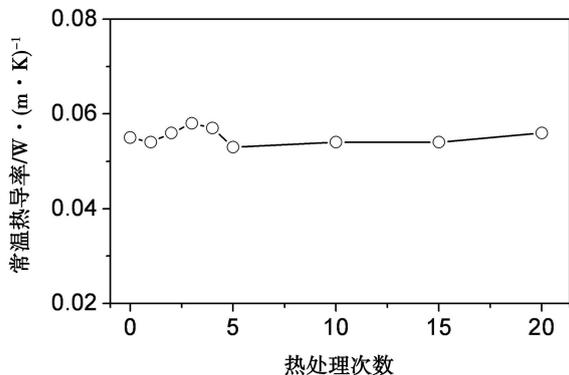


图 5 热处理次数对隔热瓦隔热性能的影响

Fig. 5 Thermal conductivity of rigid insulation tiles after heat treatment for different times

2.4 微观结构稳定性评价

图 6 是热处理前和热处理 1~5 次、10 次、15 次、20 次后的隔热瓦孔径分布曲线,可以看到,热处理前后差别很小,与 SEM 看到的結果一致。

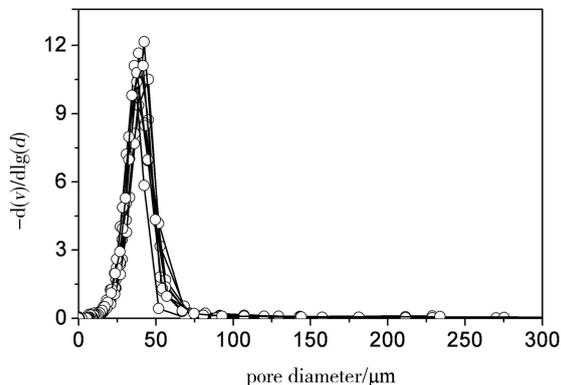


图 6 热处理次数对隔热瓦孔径分布的影响

Fig. 6 Pore size distributions of rigid insulation tiles heat-treated for different times

3 结论

(1) 隔热瓦经 1 200 $^{\circ}\text{C}/30$ min 热处理 20 次后,质量损失率、 xy 向线性收缩率、隔热性能以及微观结构变化都很小,仅 z 向线性收缩率稍大,为 3.19%。

(2) 综合各项性能来看,1 200 $^{\circ}\text{C}/30$ min 的使用条件下,隔热瓦能够满足 20 次的重复使用要求。

参考文献

- [1] 王思青,张长瑞,周新贵,等. 重复使用运载器陶瓷热防护系统[J]. 导弹与航天运载技术,2004(3):37-41
- [2] 解维华,张博明,杜善义. 重复使用飞行器金属热防护系统的有限元分析与设计[J]. 航空学报,2006,27(4):650-656
- [3] Howard E Goldstein(谭剑波译,黄幼文校). 陶瓷纤维隔热系统[J]. 宇航材料工艺,1990,20(5):30-34
- [4] 曾昭焕. 航天飞机用刚性隔热瓦防热材料发展概况[J]. 宇航材料工艺,1989(3):12-20
- [5] 王康太,冯坚,姜勇刚,等. 陶瓷纤维刚性隔热瓦研究进展[J]. 材料导报,2011,25(12):35-39
- [6] Marshall L A, Corpening G P, Sherrill P. A chief engineer's view of the NASA X-43A scramjet flight test[C]. American institute of aeronautics and astronautics, 2005

(编辑 任涛)