

# SiC<sub>f</sub>/TB8 复合材料的制备及其热物理性能研究

林松<sup>1,2</sup>, 赵冰<sup>1</sup>, 侯红亮<sup>1</sup>, 曲海涛<sup>1</sup>

(1. 中航工业北京航空制造工程研究所, 北京 100024;

2. 中航工业北京赛福斯特技术有限公司, 北京 101107)

**[摘要]** 通过对 SiC<sub>f</sub>/TB8 复合材料制备工艺参数的优化, 得到最佳工艺参数为 830℃ /120MPa/2h。对 SiC<sub>f</sub>/TB8 复合材料的热物理性能进行了测定, SiC<sub>f</sub>/TB8 复合材料的热膨胀和热导性能高于 TB8 基体, 随着热处理时间的延长, SiC<sub>f</sub>/TB8 复合材料的热物理性能表现出良好的稳定性。

**关键词:** SiC<sub>f</sub>/TB8 复合材料; 箔-纤维-箔法; 热物理性能

## Preparation and Thermo-Physical Properties of SiC<sub>f</sub>/TB8 Composites

LIN Song<sup>1,2</sup>; ZHAO Bing<sup>1</sup>; HOU Hongliang<sup>1</sup>; QU Haitao<sup>1</sup>

(1. AVIC Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China;

2. AVIC Beijing CFSW Technology Co., LTD., Beijing 100024, China;)

**[ABSTRACT]** Through optimizing SiC<sub>f</sub>/TB8 composite material process parameters to obtain optimal parameters is 830℃ /120MPa/2h. Thermal physical properties SiC<sub>f</sub>/TB8 matrix composites is measured, the thermal expansion and thermal conductivity properties of the composites is higher than TB8 matrix. With prolonged heat treatment time, thermal physical properties SiC<sub>f</sub>/TB8 composites exhibited good stability.

**Keywords:** SiC<sub>f</sub>/TB8 composites; Foil-fiber-foil process; Thermo-physical properties

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2016.08.093

随着高超音速飞行器的发展, 飞行速度的不断提高, 对高温蒙皮结构材料的要求越来越高, 需要具有较高的比强度、比刚度, 以及优异的高温性能和抗腐蚀性能。传统的陶瓷瓦具有脆性大、抗损伤能力差、维护成本高、更换周期长等缺点, 已经不能满足高超音速飞行器蒙皮结构的需求。因此, 金属或金属基复合材料的隔热结构成为最具发展前景的高温蒙皮候选材料<sup>[1-3]</sup>。

SiC<sub>f</sub>/TB8 复合材料是以新型耐高温合金 TB8 钛合金为基体, 以高强度连续 SiC 纤维作为增强项经过热压复合工艺制备而成的钛基复合材料。20 世纪 80 年代, 美国的 NASA 在 NASP (National Aero-Space Plane) 计划中, 针对 SiC<sub>f</sub>/TB8 复合材料作为理想的高超音速飞行器的耐高温、轻量化蒙皮结构材料开展了大量的技术基础和应用基础研究, 并应用在 X-30 验证机上。但目前国内对高超音速蒙皮材料的研究还处于空白状态, 因此, 开展制备 SiC<sub>f</sub>/TB8 复合材料的研究对我国发展高超音速飞行器具有重要的意义<sup>[4-5]</sup>。

本文对 SiC<sub>f</sub>/TB8 复合材料的制备工艺参数进行了优化, 从而得到最佳制备工艺参数。同时对 SiC<sub>f</sub>/TB8 复合材料热物理性能进行研究, 包括高温热导性能和高

温热膨胀性能, 已确定其是否具有很好的耐高温性能, 为其作为耐高温蒙皮材料提高理论依据<sup>[6]</sup>。

## 1 材料与方法

在试验中选用基体材料为 TB8 箔材, 厚度为 0.1mm; 增强纤维选用国产有 C 涂层的 SiC 纤维, 纤维直径为 130μm。

利用箔-纤维-箔经热等静压工艺制备钛基复合材料 SiC<sub>f</sub>/TB8, 热等静压工艺参数分别采用 770℃ /120MPa/2h, 800℃ /120MPa/2h, 830℃ /120MPa/2h, 860℃ /120MPa/2h。每个工艺参数做了两组试样, 取其效果较好的试样进行组织及成分分析, 确定最佳的制备工艺条件。制备好的 SiC<sub>f</sub>/TB8 复合材料面板厚度约为 1mm。

对最佳制备工艺参数下的 SiC<sub>f</sub>/TB8 复合材料进行真空热处理, 热处理条件为 760℃ /9h/25h/49h。对热处理后的 SiC<sub>f</sub>/TB8 复合材料进行热导性能和热膨胀性能测试, 热物理性能测试范围是从室温到 600℃。热导性能采用瞬态平面热源法测得, 热膨胀性能采用光杠杆法测得。

## 2 结果与分析

### 2.1 SiC<sub>f</sub>/TB8复合材料工艺参数优化

图1为4种工艺参数下的基体形貌照片。从微观组织照片可以看出:770℃/120MPa/2h和800℃/120MPa/2h两种热等静压条件下的SiC<sub>f</sub>/TB8复合材料箔材与箔材之间没有形成很好的扩散连接界面,箔材层与层之间的分界线十分明显。860℃/120MPa/2h热等静压条件下箔材与箔材之间虽然结合的不错,但是箔材与纤维之间出现了“耳状”空洞,没有形成很好的连接。而830℃/120MPa/2h热等静压条件的微观组织照片可以看出,虽然还能看出一点箔材层与层之间的界面,但是宏观来看基本已经形成了一个整体。而且纤维与箔材也形成了很好的结合,没有发现空洞等缺陷。所以830℃/120MPa/2h条件下制备的SiC<sub>f</sub>/TB8复合材料的最好。

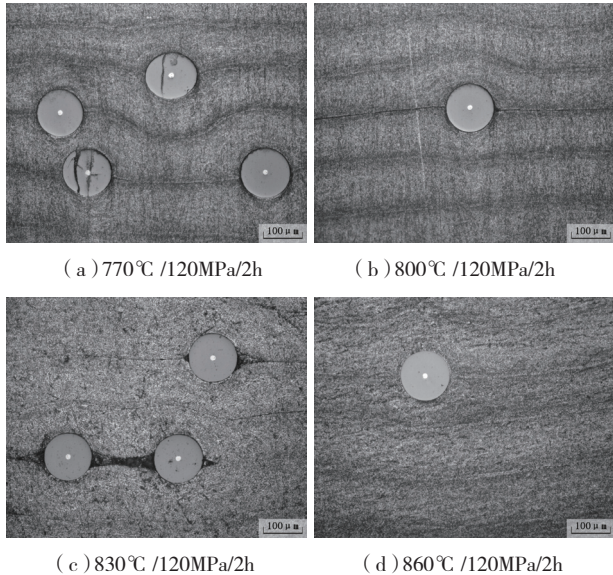


图1 4种工艺参数下的基体形貌  
Fig.1 Matrix morphology of four process parameters

图2为4种工艺参数下界面微观形貌照片。5000倍下纤维与箔材界面的扫描照片,从扫描照片可以看出,770℃/120MPa/2h条件下,纤维与箔材没有形成界面的结合,纤维与箔材之间有空洞,没有形成扩散连接。可能的原因是温度较低,纤维与箔材之间原子扩散不充分,没有形成界面结合。800℃/120MPa/2h、830℃/120MPa/2h、860℃/120MPa/2h条件下都形成了纤维与箔材之间的界面,但是800℃/120MPa/2h条件下形成的界面不均匀,有的地方界面薄、有的地方界面厚,没有形成连续均匀的界面,这是不好的。860℃/120MPa/2h条件下形成的界面非常明显,但是界面厚度过厚,界面反应过厚,界面间就会生成脆性相,使

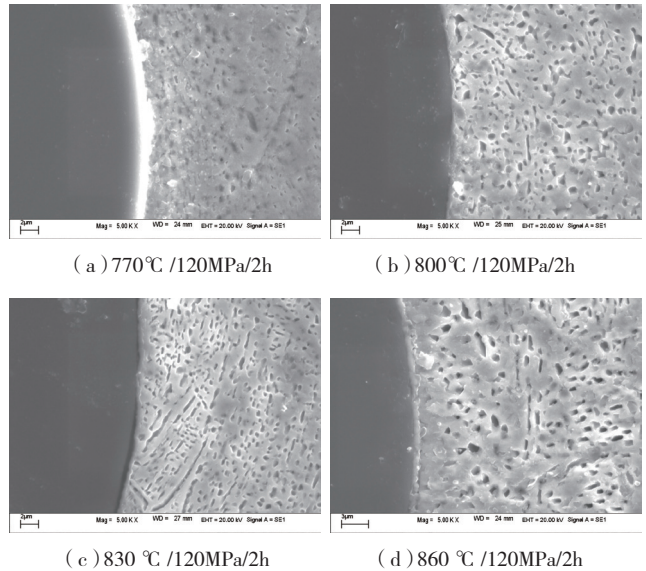


图2 4种工艺参数下的界面微观形貌  
Fig.2 Interfacial microstructure of four parameters

界面的性能降低。830℃/120MPa/2h条件下形成的界面非常均匀,且只有薄薄的一层,大概在1μm左右,是理想的界面厚度。所以830℃/120MPa/2h条件下制备的SiC<sub>f</sub>/TB8复合材料最好。

通过对SiC<sub>f</sub>/TB8复合材料的宏观金相观察TB8箔材于箔材之间的界面,通过SEM照片观察SiC纤维和TB8箔材之间的界面,得出最佳热等静压工艺参数为830℃/120MPa/2h。

### 2.2 SiC<sub>f</sub>/TB8复合材料的热导性能

热扩散系数和热导率满足公式1。

$$\alpha = \frac{k}{\rho c} \quad (1)$$

式中, $\alpha$ 是热扩散系数,单位mm<sup>2</sup>/s; $k$ 是热导率,单位W/(m·K); $c$ 是比热容,单位J/(g·K); $\rho$ 是密度,单位g/cm<sup>3</sup>。

表1是TB8钛合金热导性能测试结果,表2是SiC<sub>f</sub>/TB8复合材料热导性能测试结果。

从图3中可以看出,TB8钛合金和SiC<sub>f</sub>/TB8复合材

表1 TB8钛合金热导性能

温度/℃	热扩散系数 $\alpha / (\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	热导率 $k /$ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	比热容 $C /$ $(\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	密度 $\rho /$ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
25	3.164	7.60	0.487	4.93
100	2.987	7.45	0.506	4.93
200	2.818	7.24	0.521	4.93
300	2.623	7.00	0.541	4.93
400	2.475	6.79	0.557	4.93
500	2.332	6.58	0.572	4.93
600	2.208	6.39	0.587	4.93

表2 SiC<sub>f</sub>/TB8复合材料热导性能

温度 /℃	热扩散系数 $\alpha / (\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	热导率 $k / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	比热容 $C / (\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
25	2.587	6.60	0.580	4.41
100	2.441	6.47	0.602	4.41
200	2.304	6.28	0.620	4.41
300	2.145	6.08	0.644	4.41
400	2.021	5.89	0.663	4.41
500	1.907	5.71	0.681	4.41
600	1.805	5.55	0.699	4.41

料的热导率基本随温度的升高成线性下降的趋势,温度越高,热导率越低,即材料的导热性能越来越低。而且 SiC<sub>f</sub>/TB8 复合材料的热导率要低于 TB8 钛合金的热导率,说明 SiC<sub>f</sub>/TB8 复合材料的导热性能要比 TB8 钛合金要低,即在相同的温度条件下 SiC<sub>f</sub>/TB8 复合材料更不易传导热量,具有更高的耐热性能。所以 SiC<sub>f</sub>/TB8 复合材料的耐高温性能要比单纯的 TB8 钛合金要强很多。满足了耐高温轻量化蒙皮制造的要求。

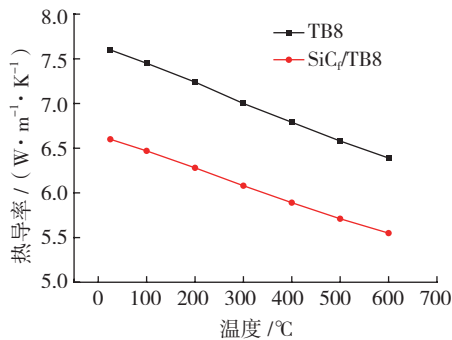


图3 TB8钛合金和SiC<sub>f</sub>/TB8复合材料的热导率  
Fig.3 Thermal conductivity of TB8 and SiC<sub>f</sub>/TB8

表3是在760℃条件下,经过9h、25h、49h不同时间的热处理后, SiC<sub>f</sub>/TB8 复合材料的热导性能试验结果。

通过表3和图4可以看出,经过不同的热处理工艺后, SiC<sub>f</sub>/TB8 复合材料的热导率和热扩散系数都没有发生明显的变化,只有轻微的波动,说明 SiC<sub>f</sub>/TB8 复合材料经过长时间的高温处理后其耐高温性能依然很好。所以 SiC<sub>f</sub>/TB8 复合材料作为耐高温轻量化蒙皮的材料是十分合适的。

### 2.3 SiC<sub>f</sub>/TB8复合材料的热膨胀性能

表4是TB8钛合金和 SiC<sub>f</sub>/TB8 复合材料热膨胀系数的测定结果。

TB8 钛合金和 SiC<sub>f</sub>/TB8 复合材料的膨胀系数结果如图5所示。从结果中可以看出 TB8 钛合金的热膨胀系数在300℃以下时,很稳定,但高于300℃时,热膨胀系数急剧上升,说明单纯的TB8钛合金的高温使用温度在300℃左右。但是 SiC<sub>f</sub>/TB8 复合材料的热膨胀系数在

表3 SiC<sub>f</sub>/TB8复合材料的热导性能试验结果

热处理工艺	温度 /℃	热扩散系数 $\alpha / (\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	热导率 $k / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	比热容 $C / (\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
760℃ /9h	25	2.574	6.61	0.584
	100	2.442	6.48	0.603
	200	2.299	6.30	0.623
	300	2.145	6.10	0.646
	400	2.019	5.91	0.665
	500	1.914	5.75	0.683
760℃ /25h	25	2.572	6.63	0.586
	100	2.443	6.49	0.604
	200	2.300	6.32	0.624
	300	2.148	6.13	0.649
	400	2.021	5.93	0.667
	500	1.913	5.76	0.684
760℃ /49h	25	2.521	6.52	0.588
	100	2.413	6.43	0.606
	200	2.271	6.28	0.628
	300	2.120	6.08	0.652
	400	2.013	5.92	0.669
	500	1.898	5.73	0.687
600	1.811	5.57	0.698	

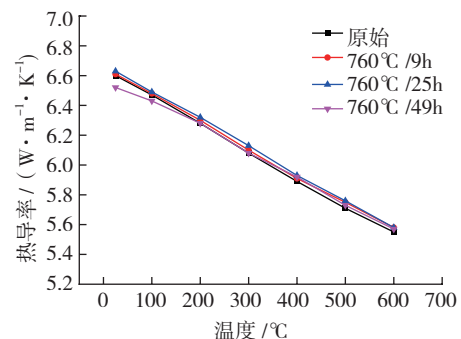


图4 不同热处理后SiC<sub>f</sub>/TB8的热导率  
Fig.4 Thermal conductivity of SiC<sub>f</sub>/TB8 under different heat treatment

表4 TB8和SiC<sub>f</sub>/TB8热膨胀系数

温度 /℃	TB8 热膨胀系数 / ( $\text{K}^{-1} \cdot 10^{-6}$ )	SiC <sub>f</sub> /TB8 热膨胀系数 / ( $\text{K}^{-1} \cdot 10^{-6}$ )
50	4.935	10.321
100	5.282	11.187
200	5.808	11.774
300	8.181	11.999
400	18.556	12.157
500	33.199	12.259
600	55.709	12.381

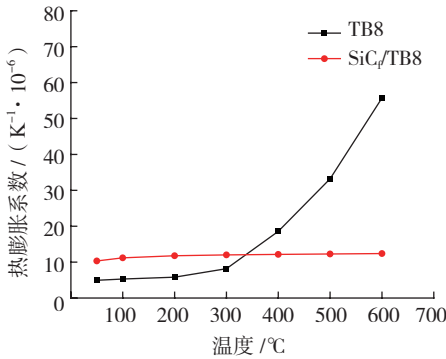


图5 TB8和SiC<sub>f</sub>/TB8的膨胀系数  
Fig.5 Thermal expansion of TB8 and SiC<sub>f</sub>/TB8

600℃以内都非常稳定,这是因为在复合材料中有SiC纤维, SiC纤维具有很好的热稳定性和耐高温性, SiC纤维的耐高温性能能达到1500℃,所以在SiC<sub>f</sub>/TB8复合材料中其起到增强作用。

图6为在760℃条件下,经过9h、25h、49h不同时间的热处理后, SiC<sub>f</sub>/TB8复合材料的热膨胀性能试验结果。

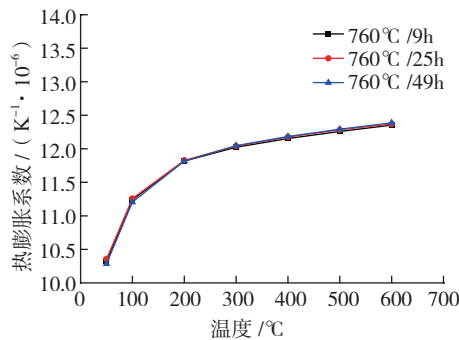


图6 热处理后SiC<sub>f</sub>/TB8的热膨胀性能结果  
Fig.6 Thermal expansion of SiC<sub>f</sub>/TB8 under different heat treatment

经过不同的热处理工艺后, SiC<sub>f</sub>/TB8复合材料的热膨胀系数没有发生明显的变化,只有轻微的波动,说明SiC<sub>f</sub>/TB8复合材料经过长时间的高温处理后其耐高温膨胀性能依然很好,长时间高温条件下体积变化不大。可以作为耐高温零件的备用材料,所以SiC<sub>f</sub>/TB8复合材料作为耐高温轻量化蒙皮的材料是十分合适的。

### 3 结论

(1)通过对SiC<sub>f</sub>/TB8复合材料的微观组织和界面研究,得到其最佳制备工艺参数为830℃/120MPa/2h。

(2)SiC<sub>f</sub>/TB8复合材料的热导性能和热膨胀性能都优于TB8钛合金,并且经过长时间热处理后SiC<sub>f</sub>/TB8复合材料的热物理性能依然很稳定,从耐高温性能方面考虑其适合作为耐高温蒙皮材料。

### 参考文献

[1] P R SUBRAMANIAN, S KRISHNAMURTHY, S T KELLER.

Processing of continuously reinforced Ti-alloy metal matrix composites (MMC) by magnetron sputtering[J]. Materials Science and Engineering A, 1998, 244:1-10.

[2] 梁春华. 连续纤维增强的金属基复合材料部件在航空涡扇发动机上的应用[J]. 航空制造技术, 2009(15):32-35.

LIANG Chunhua. Application of continuous fiber reinforced metal matrix composite component on turbofan aeroengine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(15):32-35.

[3] 杨锐, 石南林, 王玉敏, 等. SiC纤维增强钛基复合材料研究进展[J]. 钛工业进展, 2005, 31(5):32-36.

YANG Rui, SHI Linnan, WANG Yumin, et al. Recent progress in SiC fibre reinforced titanium matrix composites[J]. Titanium, 2005, 31(5):32-36.

[4] 杨延清, 朱艳, 陈彦, 等. SiC纤维增强Ti基复合材料的制备及性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2002(3):201-204.

YANG Yanqing, ZHU Yan, CHEN Yan, et al. Processing and property of SiC Fiber reinforced Ti-matrix composite[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2002(3):201-204.

[5] CARRERE N, VALLE R, BRETHERAU T. Multiscale analysis of the transverse properties of Ti matrix composites reinforced by SiC fibre: from the grain scale to the macroscopic scale[J]. International Journal of Plasticity, 2004, 20(4): 783-810.

[6] 费铸铭, 李贤淦, 王惠. 颗粒增强金属基复合材料的热导率[J]. 复合材料学报, 1990, 7(3):27-33.

FEI Zhuming, LI Xianjin, WANG Hui. The thermal conductivity of particulate-reinforced aluminium composite materials[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 1990, 7(3):27-33.

(责编 冬月)

(上接第92页)

业大学, 2008.

WU Jun. Influence of polishing after shop peening on 300M steel[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2008.

[2] 张新华. TC4钛合金喷丸强化表面性能对比研究[J]. 航空制造技术, 2013(16):41-43.

ZHANG Xinhua. Comparison research on surface performance of shot-peening TC4[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(16):41-43.

[3] 王强. 高强度钢试样喷丸残余应力实验研究及数值模拟[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2006.

WANG Qiang. Experimental investigation on residual stress of high-strength steel after shot-peening and its simulation[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2006.

[4] 万盼兵, 张伟, 汪勇, 等. 喷丸强化对H08Mn2Si堆焊层残余应力及组织结构的影响[J]. 中国表面工程, 2013, 26(4):38-39.

WAN Panbing, ZHANG Wei, WANG Yong, et al. Effect of shot-peening on residual stresses and microstructure of H08Mn2Si steel layer[J]. China Surface Engineering, 2013, 26(4):38-39.

[5] 王欣, 王强, 宋颖刚, 等. 陶瓷丸喷丸对2124铝合金疲劳性能的影响[J]. 材料保护, 2011, 9(44):38-40.

WANG xin, WANG qiang, SONG Yinggang, et al. Effect of ceramic shot peening on the Fatigue performance of 2124 aluminum alloy[J]. Materials Protection, 2011, 9(44):38-40.

(责编 冬月)