

特约专栏

C/C 复合材料 ZrB_2 -SiC 基陶瓷涂层制备及 烧蚀性能研究

张天助, 陈招科, 熊翔

(中南大学粉末冶金国家重点实验室, 湖南长沙 410083)

摘要: 为提高 C/C 复合材料的抗烧蚀性能, 采用两步刷涂-烧结法制备了 ZrB_2 -SiC 基陶瓷涂层。首先利用反应烧结制备 ZrB_2 -SiC-ZrC 过渡层, 并在此基础上制备了 ZrB_2 -20% SiC-5% Si_3N_4 、 ZrB_2 -15% SiC-20% MoSi_2 、 ZrB_2 -15% SiC-20% TaC 3 种外涂层。利用 XRD 和扫描电镜研究了涂层的相组成和显微形貌, 并采用氧乙炔焰烧蚀仪测试了涂层在 2 500 °C、60 s 的抗烧蚀性能, 探讨了涂层的高温烧蚀机理。结果表明: 利用反应烧结制备的过渡层与基体结合紧密, 且与外涂层无明显分层现象, 起到了良好的过渡作用; 由于 Si_3N_4 及 MoSi_2 起到了烧结助剂作用, 使 ZrB_2 -20% SiC-5% Si_3N_4 、 ZrB_2 -15% SiC-20% MoSi_2 外涂层结构较为致密; ZrB_2 -20% SiC-5% Si_3N_4 、 ZrB_2 -15% SiC-20% MoSi_2 涂层表现出了较好的抗烧蚀性能, 其中 ZrB_2 -20% SiC-5% Si_3N_4 涂层线烧蚀率及质量烧蚀率分别为 0.075 mm/s、0.0081 g/s, ZrB_2 -15% SiC-20% MoSi_2 涂层线烧蚀率及质量烧蚀率分别为 0.018 mm/s、0.0064 g/s, 而 ZrB_2 -15% SiC-20% TaC 涂层由于结构较为松散, 未能起到有效的氧化防护, 导致涂层被烧穿。

关键词: C/C 复合材料; ZrB_2 -SiC 涂层; 刷涂法; 抗烧蚀

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2013)11-0659-06

Preparation and Ablative Behavior of ZrB_2 -SiC Based Coatings on C/C Composites

ZHANG Tianzhu, CHEN Zhaoke, XIONG Xiang

(State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: To improve the ablation resistance, ZrB_2 -SiC coatings were prepared by two-step slurry painting on C/C composites. The ZrB_2 -SiC-ZrC transition layer was prepared by reactive sintering, then ZrB_2 -20% SiC-5% Si_3N_4 、 ZrB_2 -15% SiC-20% MoSi_2 、 ZrB_2 -15% SiC-20% TaC outer coatings were prepared on it. The ablation test was conducted under oxy-acetylene torch at 2 500 °C for 60s. X-ray diffractometry and scan electron microscopy were employed to investigate the microstructure and ablation mechanism. The results show that the transition layer has a good combination with the matrix, and no obvious lamination appeared when connected to the outer layer. Owing to the effect of Si_3N_4 and MoSi_2 as sintering aids, the structure of ZrB_2 -20% SiC-5% Si_3N_4 and ZrB_2 -15% SiC-20% MoSi_2 outer coating is quite dense. Coating ZSS and ZSM showed better ablation resistance. The linear ablative rate and mass ablative rate of coating ZSS and ZSM were 0.075 mm/s, 0.0081 g/s and 0.018 mm/s, 0.0064 g/s respectively. The coating ZST does not show effective oxidation protection because of its loose structure, and it caused the burning through of the coating.

Key words: C/C composites; ZrB_2 -SiC coating; brush coating; anti-ablation

1 前言

C/C 复合材料具有低密度、高比强度、高比模量、

抗烧蚀、尺寸稳定性好、在 2 000 °C 以上强度保持率高等优异性质, 在高温热结构应用领域具有金属基、陶瓷基复合材料不可比拟的优势; 可广泛应用于航空航天、核能等领域^[1-2]。然而, C/C 复合材料在 500 °C 时迅速氧化, 力学性能急剧下降, 限制了它在高温有氧环境中的应用^[3]。因此, 如何解决 C/C 复合材料在高温有氧环境下的防护问题是其得到广泛应用的关键。

收稿日期: 2013-07-12

基金项目: 国家重点基础研究项目(2011CB605805)

第一作者: 张天助, 男, 1987 年生, 硕士研究生

通信作者: 陈招科, 男, 1978 年生, 副研究员

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2013.11.04

提高 C/C 复合材料抗氧化抗烧蚀性能的方法主要有基体改性和涂层两种方法。与基体改性相比,涂层可将 C/C 复合材料与外部环境直接隔离,防止外部氧化性气氛进入 C/C 基体内部。

过渡族金属元素硼化物、氮化物、碳化物等超高温陶瓷都具有极高的熔点($>2\ 500\ ^\circ\text{C}$), ZrB_2 作为最具有代表性的一种,不仅具有高熔点($3\ 245\ ^\circ\text{C}$),还具有高导热率、高弹性模量、良好的抗热震性、化学稳定性等优点^[4-7],是 C/C 复合材料抗氧化抗烧蚀涂层的优选材料。但纯 ZrB_2 烧蚀性较差,一般需要引入 SiC 提升烧蚀性能,从而降低烧蚀温度。同时, SiC 的加入也能大幅提升其氧化性能和力学性能^[5,7-9]。

目前,制备 ZrB_2 -SiC 基涂层的方法主要有刷涂法^[10-13]、包埋法^[14-16]和等离子喷涂法^[17-18]。其中刷涂法具有成本低,设备要求低,涂层厚度可控等优点,并拥有在大型部件上应用的潜力。本文采用两步刷涂-烧结法在 C/C 复合材料表面制备了 ZrB_2 -SiC-ZrC/ ZrB_2 -SiC 基陶瓷涂层,并详细研究了涂层的形貌、结构以及在 $2\ 500\ ^\circ\text{C}$ 下氧炔焰烧蚀行为。

2 实验

2.1 涂层制备

将密度为 $1.6\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的 C/C 复合材料机加工成 $\phi 30\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}$ 的圆柱体烧蚀试样,表面用 800 号砂纸打磨抛光,再用超声波清洗烘干后备用。

第一步,制备 ZrB_2 -SiC-ZrC 过渡层:首先配制摩尔比为 $2.2\text{Zr}-0.8\text{Si}-\text{B}_4\text{C}$ 的过渡层用粉末,将该复合金属粉末在真空球磨罐中湿磨 10 h,干燥后加入适量的 PVB 胶经搅拌均匀配制为过渡层用刷涂料;其次,将该刷涂料涂刷在 C/C 复合材料试样表面;然后,将刷涂后的试样放置于温度可达 $2\ 000\ ^\circ\text{C}$ 的真空碳管炉中进行高温烧结;该过程包括在 $400\ ^\circ\text{C}$ 、真空环境下的排胶处理,以及在 Ar 气氛下 $1\ 900\ ^\circ\text{C}$ 、1 h 的常压烧结;最后,在 C/C 复合材料基体表面获得 ZrB_2 -SiC-ZrC 过渡层。

第二步,制备 ZrB_2 -SiC 基外涂层:首先配制 ZrB_2 -20% SiC-5% Si_3N_4 、 ZrB_2 -15% SiC-20% MoSi_2 、 ZrB_2 -15% SiC-20% TaC(体积分数)3 种外涂层粉末;外涂层粉末同样需经历真空湿磨、干燥以及搅拌等过程,制成刷涂料;并最终刷涂在制备有过渡层的 C/C 基体试样上。刷涂后试样经烘干,在 $400\ ^\circ\text{C}$ 脱胶,经 $1\ 900\ ^\circ\text{C}$ 、1 h 常压烧结后制备成两层 ZrB_2 -SiC 基陶瓷复合涂层。制得涂层结构见图 1。将外涂层成分为 ZrB_2 -20% SiC-5% Si_3N_4 的样品命名为 ZSS,成分为 ZrB_2 -15% SiC-20% MoSi_2 的命名为 ZSM,成分为 ZrB_2 -15% SiC-20% TaC 的命名为 ZST。

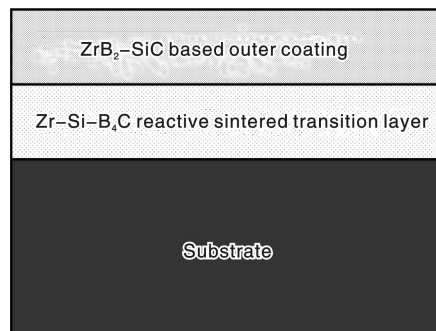


图 1 涂层结构示意图

Fig. 1 structure of the coating system

2.2 烧蚀实验

采用 DR6130 氧乙炔焰烧蚀仪(按 GJB323A-96 设计)进行涂层的烧蚀性能测试。烧蚀枪喷嘴直径 $2\ \text{mm}$,试样初始表面到火焰喷嘴距离 $10\pm 0.2\ \text{mm}$,火焰烧蚀角度 90° ,即垂直烧蚀。通过控制气体流量使烧蚀温度稳定在 $2\ 500\ ^\circ\text{C}$ 。涂层 C/C 复合材料线烧蚀率及质量烧蚀率计算公式如下:

$$R_l = \frac{\Delta d}{t} \quad (1)$$

$$R_m = \frac{\Delta m}{t} \quad (2)$$

式中: R_l 是线烧蚀率; Δd 是材料中心区域烧蚀前后厚度的差值; R_m 是质量烧蚀率; Δm 是材料烧蚀前后质量的差值; t 是烧蚀时间。

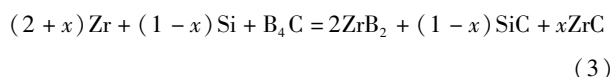
2.3 检测分析

采用日本 D/Max2550VB + 18 kW 型高功率旋转阳极靶 XRD 衍射仪(Rigaku Ltd., Japan, Cu K α Radiation, $\lambda = 1.54056\ \text{\AA}$)分析涂层的物相组成。采用 Nova Nano SEM230 场发射扫描电子显微镜(FESEM)观察涂层的显微形貌。

3 结果与分析

3.1 涂层的组织结构

图 2 为 $2.2\text{Zr}-0.8\text{Si}-\text{B}_4\text{C}$ 粉末反应烧结形成的过渡层的 XRD 图谱。本配方参照反应烧结制备 ZrB_2 -SiC-ZrC 三相陶瓷^[19]配制,其反应方程式为:



由反应可知,该配方粉未经 $1\ 900\ ^\circ\text{C}$ 烧结后主要生成 ZrB_2 、SiC 及 ZrC 相。对照 XRD 图谱,反应生成了 ZrB_2 及 SiC,而 ZrC 则可能是因为含量较少,XRD 没有检测到;另外,除上述反应生成物外,涂层中还含有 C 相及少量 ZrO 相,C 主要是由 PVB 胶在高温下分解残留下来的,而 ZrO 则是由于制备过程中混入的少量氧气发

生氧化造成的。

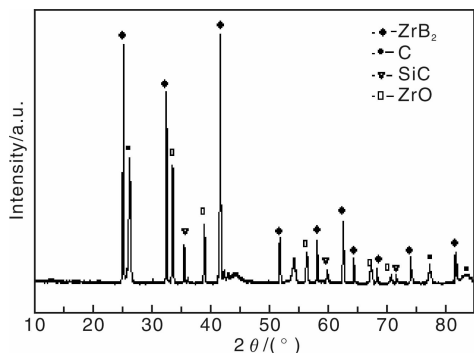


图 2 过渡层表面 XRD 图谱

Fig. 2 XRD spectrum for the surface of the transition layer

图 3 为过渡层表面 SEM 照片及 EDS 分析结果。从图 3 可以看出, 涂层晶粒较细, 呈现出一种多孔结构, 孔径在 $2 \sim 10 \mu\text{m}$ 之间。这种多孔形貌一方面有利于外层涂层与过渡层之间形成镶嵌结构, 提高结合强度; 另一方面, 存在的孔隙会钝化裂纹尖端, 促使裂纹扩展方向发生偏转, 提高了涂层的抗裂纹扩展能力^[20]。EDS 分析表明白色相为 ZrB_2 , 灰色相为 SiC, SiC 较为均匀的分布在 ZrB_2 周围。

图 4 为 3 种外涂层的表面微观形貌。从图 4 可以看出, ZSS 与 ZSM 涂层晶粒较粗, 无明显孔隙; 与之相

比, ZST 涂层晶粒较细, 但存在明显孔隙, 不利于阻挡氧气的渗透。上述结果说明 Si_3N_4 与 MoSi_2 可起到烧结助剂的作用, 有效提高涂层的致密度。

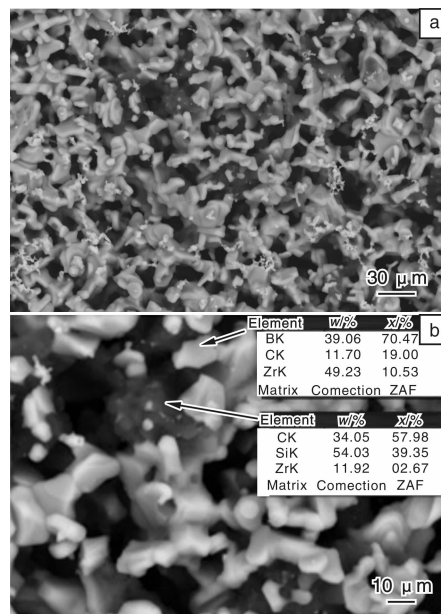


图 3 过渡层表面 SEM 照片及 EDS 分析: (a) 2 000 倍, (b) 5 000 倍

Fig. 3 Surface morphologies of the transition layer and EDS analysis: (a) $\times 2\,000$ and (b) $\times 5\,000$

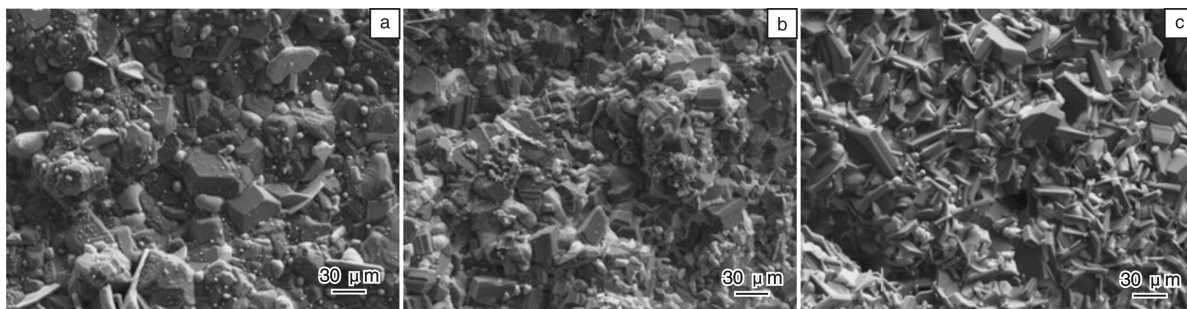


图 4 外涂层表面微观形貌: (a) ZSS, (b) ZSM, (c) ZST

Fig. 4 Surface morphologies of different outer coatings: (a) ZSS, (b) ZSM, and (c) ZST

图 5 为涂层横截面形貌。涂层厚度大约在 $80 \sim 120 \mu\text{m}$ 之间, 外层涂层与过渡层间结合良好, 无明显裂纹及分层现象。另外, 由于 C/C 基体表面存在少量开孔孔隙, 过渡层部分原始粉末渗入基体孔隙中, 产生扎钉作用, 提高了涂层与基体间的结合强度。

3.2 涂层的烧蚀性能

表 1 是涂层试样烧蚀实验结果。由表 1 可知, 线烧蚀率 $\text{ZSM} < \text{ZSS} < \text{ZST}$, 质量烧蚀率 $\text{ZST} < \text{ZSM} < \text{ZSS}$, 即 ZSM 涂层试样线烧蚀率最低, ZST 涂层试样质量烧蚀率最低。图 6 是涂层烧蚀后的宏观照片。由图 6 可知, 经氧炔焰高温烧蚀后, ZSS 涂层试样

(图 6a) 表面形成了白色的熔融氧化物层, 但氧化物层与 C/C 复合材料基体的结合不好, 在高温冷却过程中, 氧化物层局部产生剥落, 导致该涂层试样的质量烧蚀率达到了 0.008 g/s ; ZSM 涂层试样(图 6b)表面也形成了较好的白色熔融氧化物层, 该氧化物层可很好地覆盖在 C/C 复合材料表面, 对 C/C 复合材料基体提供有效保护; 与之相比, ZST 涂层的烧蚀中心区域被烧穿, 无法对 C/C 复合材料基体提供有效防护, 这主要归因于 ZST 涂层中孔隙较多, 在烧蚀过程中无法阻挡氧化性气氛的入侵, 加速了内部涂层的氧化, 导致涂层失效。

综合表 1 和图 6 可以看出, ZSM 可起到较好的烧蚀

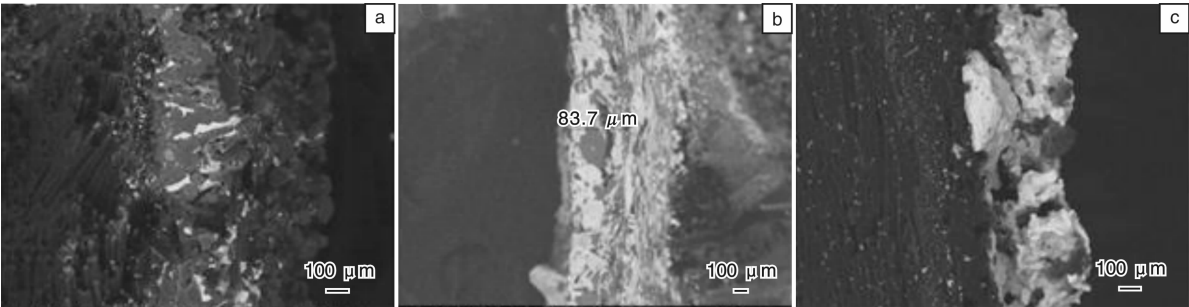


图 5 涂层横截面 SEM 形貌: (a)ZSS, (b)ZSM, (c)ZST

Fig. 5 Cross-sectional structure SEM images of different coatings: (a)ZSS, (b)ZSM, and (c)ZST

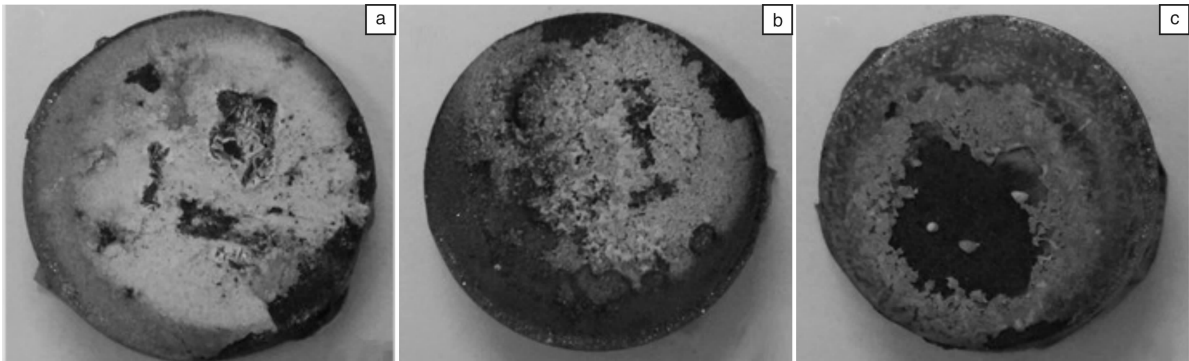


图 6 烧蚀后涂层宏观形貌: (a)ZSS, (b)ZSM, (c)ZST

Fig. 6 Macrographs of the ablated coatings: (a)ZSS, (b)ZSM, and (c)ZST

表 1 涂层试样烧蚀实验结果

Table 1 results of ablation test

Samples	Liner ablating rate $R_l/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	Mass ablating rate $R_m/\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$
ZSS	0.075	0.008 1
ZSM	0.018	0.006 4
ZST	0.130	0.004 1

防护作用。在烧蚀过程中, ZSM 涂层在最高温度达 2 500 ℃ 的高温氧乙炔焰作用下发生了一系列化学及物理反应。其中化学反应主要是涂层与氧气发生反应。物理反应主要是指涂层在高温、高压、高速的火焰作用下发生的熔化、挥发、剥离等。在本实验中, ZSM 涂层主

要发生的反应如下:

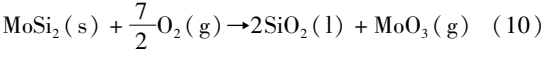
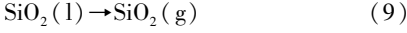
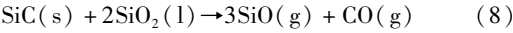
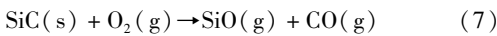
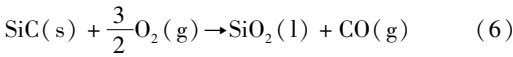
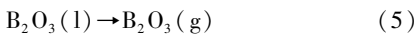
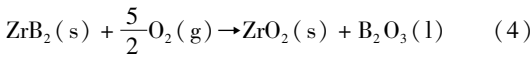


图 7 为 ZSM 涂层烧蚀后的微观形貌及 EDS 分析结

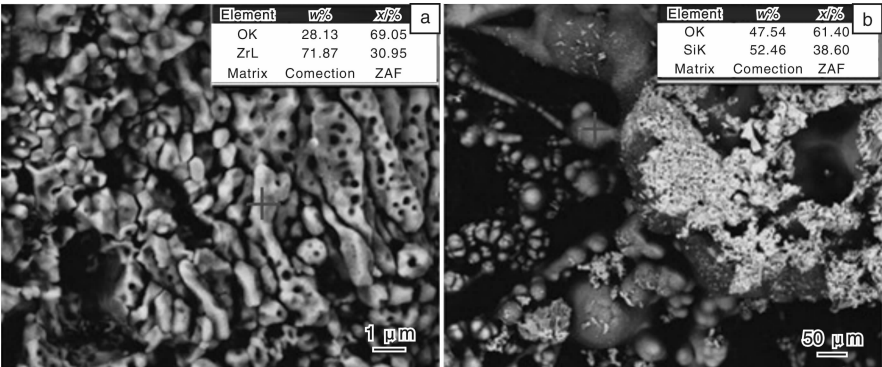


图 7 ZSM 涂层烧蚀后微观形貌及 EDS 分析: (a)中心区域, (b)过渡区域

Fig. 7 Micrographs of the ZSM coating after ablation and EDS analysis: (a)center region and (b)transition region

果。从图 7 可以看出, ZSM 涂层烧蚀中心区域是以 ZrO₂ 为骨架的结构(图 7a), ZrB₂、SiC、MoSi₂ 在高温氧炔焰作用下发生氧化(见反应式(4), (6), (7), (10)), 生成 ZrO₂、B₂O₃、SiO₂、MoO₃ 等氧化产物, 而 B₂O₃、SiO₂、MoO₃ 在 2 000 °C 以上高温下均有很高的蒸汽压^[21], 在烧蚀过程中迅速发生挥发, 部分液滴形成后即在高速、高压气流的冲刷下脱离涂层, 所以形成了这种以 ZrO₂ 为骨架的结构; 在烧蚀过渡区域(图 7b), 发现了 SiO₂ 液滴的存在, 这是由于烧蚀过渡区域温度较低, 气流冲刷作用减弱, 部分 SiO₂ 液滴得以保留。另一方面, 氧化反应及氧化产物的挥发均能消耗大量热, 可有效降低涂层的表面温度, 降低涂层的氧化速率, 最终较好地保持了涂层的完整性。

4 结 论

(1) 利用刷涂法, 再通过反应烧结制备的 ZrB₂-SiC-ZrC 过渡层在 1.6 g·cm⁻³ C/C 复合材料基体上表现出了良好的结合性能, 且与外层涂层相容性好, 无明显分层现象, 起到了良好的过渡作用。

(2) ZSS 及 ZSM 外涂层较为致密, 归因于 Si₃N₄、MoSi₂ 的烧结助剂作用。

(3) ZSM 涂层的线烧蚀率及质量烧蚀率分别为 0.018 mm/s、0.006 4 g/s, ZSS 涂层线烧蚀率及质量烧蚀率分别为 0.075 mm/s、0.008 1 g/s, 这两种涂层均表现出了良好的抗烧蚀性能, 而 ZST 涂层由于结构较为松散, 未起到有效的氧化防护作用, 导致涂层烧蚀中心区域被完全烧穿。

参考文献 References

- [1] Chu Yanjun (褚衍辉), Fu Qiangang (付前刚), Li hejun (李贺军), *et al.* 炭/炭复合材料高温防氧化陶瓷涂层的研究新进展[J]. *Journal of Materials Engineering* (材料工程), 2010, (008): 86-91.
- [2] Li Bin (李 斌), Chen Zhaoke (陈招科), Xion Xiang (熊翔). 热处理对含 C-SiC-TaC-C 界面 C/C 复合材料力学性能的影响[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica* (复合材料学报), 2012, 29(001): 98-103.
- [3] Luthra K L. Oxidation of Carbon/Carbon Composites-a Theoretical Analysis[J]. *Carbon*, 1988, 26(2): 217-224.
- [4] Sonber J K, Murthy T S R, Subramanian C, *et al.* Investigations on Synthesis of ZrB₂ and Development of New Composites with HfB₂ and TiSi₂ [J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2011, 29(1): 21-30.
- [5] Zhang S C, Hilmas G E, Fahrenholtz W G. Pressureless Sintering of ZrB₂-SiC Ceramics[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2008, 91(1): 26-32.
- [6] Guo W M, Yang Z G, Zhang G J. Microstructural Evolution of ZrB₂-MoSi₂ Composites during Heat Treatment[J]. *Ceramics International*, 2011, 37(7): 2 931-2 935.
- [7] Guo S Q. Densification of ZrB₂-Based Composites and Their Mechanical and Physical Properties: A Review[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2009, 29(6): 995-1 011.
- [8] Zhang Guojun (张国军), Zou Ji (邹 冀), Ni Dewei (倪德伟), *et al.* 硼化物陶瓷: 烧结致密化, 微结构调控与性能提升[J]. *Journal of Inorganic Materials* (无机材料学报), 2012, 27(3): 225-233.
- [9] Akin I, Hotta M, Sahin F C, *et al.* Microstructure and Densification of ZrB₂-SiC Composites Prepared by Spark Plasma Sintering[J]. *Journal of The European Ceramic Society*, 2009, 29(11): 2 379-2 385.
- [10] Xiang Y, Wei L, Song W, *et al.* Oxidation Behavior of Oxidation Protective Coatings for PIP-C/SiC Composites at 1500 °C [J]. *Ceramics International*, 2012, 38(1): 9-13.
- [11] Xiang Y, Li W, Wang S, Zhang B F, *et al.* ZrB₂/SiC as a Protective Coating for C/SiC Composites: Effect of High Temperature Oxidation on Mechanical Properties and Anti-Ablation Property[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2013, 45(1): 1 391-1 396.
- [12] Yao X Y, He J L, Yu L Z, *et al.* A SiC/ZrB₂-SiC/SiC Oxidation Resistance Multilayer Coating for Carbon/Carbon Composites[J]. *Corrosion Science*, 2012, 57: 148-153.
- [13] Wu Z Z, Yi Z, Gbologah L, *et al.* Preparation and Oxidation Property of ZrB₂-MoSi₂/SiC Coating on Carbon/Carbon Composites[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21(7): 1 538-1 544.
- [14] Yao X, Li H, Zhang Y, *et al.* A SiC-Si-ZrB₂ Multiphase Oxidation Protective Ceramic Coating for SiC-Coated Carbon/Carbon Composites[J]. *Ceramics International*, 2012, 38(3): 2 095-2 100.
- [15] Zou X, Qian Gang F, Lei L, *et al.* ZrB₂-SiC Coating to Protect Carbon/Carbon Composites against Ablation [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2013, 226: 17-21.
- [16] Tao F, Li H J, Shi X H, *et al.* Oxidation and Ablation Resistance of ZrB₂-SiC-Si/B-Modified SiC Coating for Carbon/Carbon Composites[J]. *Corrosion Science*, 2013, 67: 292-297.
- [17] Niu Y, Wang H Y, Li H, *et al.* Dense ZrB₂-MoSi₂ Composite Coating Fabricated by Low Pressure Plasma Spray (LPPS) [J]. *Ceramics International*, 2013, 39(8): 9 773-9 777.
- [18] Yao X Y, Li H J, Zhang Y L, *et al.* Ablation Behavior of ZrB₂-Based Coating Prepared by Supersonic Plasma Spraying for SiC-Coated C/C Composites under Oxyacetylene Torch [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2013, 22(4): 531-537.
- [19] Wu W W, Zhang G J, Kan Y M, *et al.* Reactive Hot Pressing of ZrB₂-SiC-ZrC Ultra High-Temperature Ceramics at 1 800 °C

- [J]. *Journal of The American Ceramic Society*, 2006, 89(9): 2 967 – 2 969.
- [20] Yan Zhiqiao(闫志巧), Xion Xiang(熊翔), Xiao Peng(肖鹏), et al. SiC/Mo-Si 复合涂层 C/SiC 复合材料的氧化性能[J]. *New Carbon Materials*(新型炭材料), 2010, 25(002): 124 – 128.
- [21] Zhang X, Hu P, Han J, et al. Ablation Behavior of ZrB₂-SiC Ultra High Temperature Ceramics Under Simulated Atmospheric Re-Entry Conditions[J]. *Composites Science and Technology*, 2008, 68(7): 1 718 – 1 726.

《中国材料进展》征稿启事

《中国材料进展》(CN 61 – 1473/TG ISSN 1674 – 3962)为中国材料研究学会会刊,是由中国材料研究学会主办,中国工程院化工、冶金与材料工程学部协办,西北有色金属研究院承办,化学工业出版社出版的国家一级学术期刊。主编由中国材料研究学会名誉理事长周廉院士担任。

《中国材料进展》每期不同的材料专栏出版形式,使期刊特色鲜明;宽泛的材料领域前沿报道,使杂志成为一个国内各材料领域研究人员进行交叉学习、合作交流的良好平台。现已编辑出版了近 50 个材料专栏,涵盖了近 40 个材料及其交叉科学研究领域。

《中国材料进展》在国内是中国期刊全文数据库(CJFD)、中文科技期刊数据库(全文版)、中国科技期刊综合评价数据库(CAJED)、中国学术期刊(光盘版)(CAJ – CD)、中国学术期刊网络出版总库、中国核心期刊(遴选)数据库、中国科学引文数据库(CSCD)、中国科技论文统计源期刊(核心版)等重要数据源来源期刊。在国际上被美国化学文摘(CA)、俄罗斯《文摘杂志》(AJ)、荷兰《摘要及引文数据库》(SCOPUS)等世界著名检索数据库收录。

本刊现面向国内及国际华人材料科学家,围绕中国材料科学领域的最新研究成果及热点,广泛征集材料科学与工程、新材料创新应用研究等领域学术领先、具有独创性及行业重要指导意义的原创性研究论文、文献综述及研究快讯。

【版权约定】

- ◆ 文责自负,编辑部拥有对投稿进行编辑出版规范化处理的权利。必要时,在征得作者同意的情况下,可实施实质内容的修改。
- ◆ 稿件一经刊出,即表明作者已经认可其版权归属《中国材料进展》杂志社(包括上网版权)。本刊在国内外文献数据库或检索系统进行交流合作时,不再征询作者意见,不另付稿酬。
- ◆ 从 2011 年 1 月 1 日起,发表费 1000 元/3 版。如果超出规定版面,另计费用。

(投稿须知请登录杂志网站: www.mat-china.com)

地址: 陕西省西安市未央路 96 号(710016) 单位: 《中国材料进展》杂志社
查询电话: 029 – 86226599 传真: 029 – 86282362 收稿日期: rml@c-nin.com