

包埋添加剂对 SiC-ZrC 涂层 C/C 复合材料 结构和性能的影响

董志军, 黄锐, 罗安安, 刘树仙, 袁观明, 丛野, 李轩科

(武汉科技大学 湖北省煤转化与新型炭材料重点实验室, 武汉 430081)

摘要: **目的** 研究不同氧化物添加剂对 SiC-ZrC 涂层 C/C 复合材料相组成、微观结构和抗氧化性能的影响。**方法** 采用包埋法, 分别以 Al_2O_3 、 B_2O_3 和 MgO 作为添加剂, 制备 SiC-ZrC 涂层 C/C 复合材料, 分析相组成及微观结构, 考察复合材料在 1000 ~ 1550 °C 静态空气气氛中的抗氧化性能。**结果** 以 Al_2O_3 作为包埋添加剂制得的涂层致密, 而以 MgO 为添加剂制得的涂层较疏松。在 1000 ~ 1550 °C 的静态空气气氛中, 随着氧化温度的升高, 以 Al_2O_3 为添加剂制得的复合材料失重率逐渐减小, 在 1550 °C 氧化 1 h 后仅为 1%; 以 B_2O_3 和 MgO 为添加剂制得的复合材料失重率逐渐增加, 在 1550 °C 氧化 1 h 后分别达到 15% 和 36%。**结论** 与 B_2O_3 添加剂相比, Al_2O_3 和 MgO 添加剂更能促进包埋粉料的扩散。以 Al_2O_3 作为包埋添加剂制得的 SiC-ZrC 涂层 C/C 复合材料具有较好的高温抗氧化性能。

关键词: C/C 复合材料; SiC-ZrC 涂层; 包埋添加剂; 抗氧化

中图分类号: TG174.453

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2014)06-0022-06

Effect of Additives Used in a Pack Cementation Technique on the Structure and Properties of SiC-ZrC Coated Carbon/Carbon Composites

DONG Zhi-jun, HUANG Rui, LUO An-an, LIU Shu-xian, YUAN Guan-ming, CONG Ye, LI Xuan-ke

(The Hubei Province Key Laboratory of Coal Conversion & New Carbon Materials,
Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

ABSTRACT: **Objective** To investigate the effect of different oxide additives on the phase composition, microstructure and oxidation resistance of the SiC-ZrC coated C/C composites. **Methods** SiC-ZrC coated C/C composites were prepared by a pack cementation technique with different oxides (Al_2O_3 , B_2O_3 or MgO) as additives. The anti-oxidation property of the SiC-ZrC coated C/C composites was also studied in the temperature range between 1000 °C and 1550 °C in static air. **Results** The results showed that Al_2O_3 and MgO additives exhibited better performance in enhancing the diffusion of the embedding powder materials than B_2O_3 additive. The SiC-ZrC coating prepared with Al_2O_3 as an additive was more compact than that prepared with MgO as an additive. The weight loss of the SiC-ZrC coated C/C composites prepared with Al_2O_3 as an additive decreased gradually with the increasing oxida-

收稿日期: 2014-07-12; 修订日期: 2014-08-20

Received: 2014-07-12; Revised: 2014-08-20

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(91016003); 国家自然科学基金专项基金项目(51352001)

Fund: Supported by the Key Program of Major Research Plan of the National Natural Science Foundation of China (91016003), and the Special Fund of the National Natural Science Foundation of China (51352001)

作者简介: 董志军(1972—), 男, 湖北天门人, 博士, 副教授, 主要研究方向为新型炭材料。

Biography: DONG Zhi-jun (1972—), Male, from Tianmen, Hubei, Ph. D., Associate professor, Research focus: new carbon materials.

通讯作者: 李轩科(1963—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 新型炭材料。

Corresponding author: LI Xuan-ke (1963—), Male, Ph. D., Professor, Research focus: new carbon materials.

tion temperature in the temperature range of 1000 ~ 1550 °C, and the weight loss was about 1% after oxidation at 1550 °C for 1 h in air. However, the weight loss of the SiC-ZrC coated C/C composites prepared with B₂O₃ or MgO as an additive increased with the increase of the oxidation temperature. After oxidation for 1 h, the weight loss of the composites prepared with B₂O₃ and MgO as additives reached 15% and 36%, respectively. **Conclusion** The SiC-ZrC coated C/C composites prepared with Al₂O₃ as an additive had good oxidation resistance at high temperature.

KEY WORDS: carbon/carbon composites; SiC-ZrC coating; additives used in a pack cementation technique; anti-oxidation

炭/炭(C/C)复合材料具有比强度高,比模量高,线膨胀系数低,断裂韧性高,密度低以及强度随温度升高而升高等优点,在航空航天、化工、冶金、交通和机械工业等领域倍受青睐^[1-3]。然而,在 450 °C 以上的氧化气氛中,C/C 复合材料会迅速氧化,从而孔隙增加,结构弱化,导致强度和其他力学性能迅速衰减^[4],这限制了其在高温有氧环境中的应用。因此,有效解决 C/C 复合材料的高温氧化防护问题是充分利用其优异性能,拓宽其应用领域的重要前提。在 C/C 复合材料表面制备抗氧化涂层能实现炭基体与外界有氧氛围的有效隔离,目前已被公认为是最有效的氧化防护手段之一^[5-6]。

SiC, Si₃N₄ 等硅类陶瓷与 C/C 复合材料有良好的化学物理相容性和相近的线膨胀系数,是理想的高温抗氧化涂层材料,但由于涂层存在制备缺陷(含有孔隙和裂纹),单独使用时的抗氧化效果不够理想^[7-9]。大量研究表明,将难熔金属碳化物/硼化物(ZrC, HfC, TaC, ZrB₂ 等)引入 C/C-SiC 复合材料,可以进一步改善和提高其抗氧化和抗烧蚀性能,使其应用于在极端环境中服役的超音速飞行器和火箭推进器等之上^[10]。ZrC 作为超高温陶瓷的重要成员之一,具有熔点高,密度低,导热性高,化学稳定性及抗热震性优异等优点^[11],其氧化产物 ZrO₂ 熔点高达 2700 °C,是一种典型的热障材料,可在 2200 °C 以上的环境中使用^[12]。更为重要的是,ZrO₂ 与 SiO₂ 在高温下反应形成的 ZrSiO₄ 可以明显改善 SiO₂ 玻璃膜的稳定性,降低氧气在玻璃膜内的扩散速率^[13],从而赋予 SiO₂ 玻璃膜极佳的抗氧化性能。因此近年来,人们尝试使用了多种方法将 SiC-ZrC 复相陶瓷引入 C/C 基体,以提高其高温抗氧化和抗烧蚀性能。在这些方法中,包埋法较为常用。由于 Si 和 C 的自扩散系数分别仅为 1.5×10^{-10} , 2.5×10^{-13} cm²/s,在高温下,Si 粉和 C 粉靠自身的扩散很难形成致密的涂层,因此通常采用氧化物作为添加剂以促进粉料的扩散,从而获得结构致密、抗氧化性能优异的涂层材料^[14]。不同的氧化物对涂层的微观结构有不同的影响,而涂层的组织结构直接影响其抗氧化性能。文中以 Zr, Si 和 C 粉为包

埋骨料,以 MgO, Al₂O₃ 和 B₂O₃ 之一作为添加剂,采用包埋法制得 SiC-ZrC 涂层 C/C 复合材料,主要分析和研究三种包埋添加剂对涂层微观结构和抗氧化性能的影响。

1 实验

1.1 SiC-ZrC 涂层 C/C 复合材料的制备

所用 C/C 复合材料采用化学气相渗透工艺(CVI)制得,密度为 1.6 g/cm³,尺寸 10 mm×10 mm×6 mm,用 400 号砂纸打磨抛光,再用无水乙醇超声波清洗,烘干后备用。

按比例称取一定量的 Si 粉、Zr 粉、C 粉和氧化物添加剂粉(粒度均为 300 目,纯度均为 99.99%),将其依次装入混料罐,并加入适量的无水乙醇。再将混料罐放在混料机上湿混 20 h,取出后自然风干,作为浸渗粉料备用。

将准备好的 C/C 复合材料置于石墨坩埚内,用浸渗粉料包埋,之后盖上坩埚盖。将石墨坩埚放入中频感应电炉,在氩气气氛保护下,按一定的升温速率升温至 2000 °C,保温 2 h 后自然冷却至室温。取出石墨坩埚,从熔体中分离出 SiC-ZrC 涂层 C/C 复合材料试样,经超声波清洗、烘干后,进行分析和表征。

1.2 分析和表征

采用 Philips X'Pert Pro MPD 型转靶 X 射线衍射仪对复合材料的物相组成进行分析,条件为:阳极 Cu 靶(Cu-Kα, λ=0.154 056 nm),工作电压 4 kV,电流 30 mA。采用带有电子能谱仪(EDS)的 NOVA400 NANOSEM 型场发射扫描电子显微镜对复合材料微区的元素组成和结构进行分析,工作电压为 20 kV。

在管式电阻炉中测试 SiC-ZrC 涂层 C/C 复合材料试样在 1000 ~ 1550 °C 静态空气中的抗氧化性能。测试时,待炉温升至指定温度后,将测试样品直接推进炉管内,氧化 1 h 后取出,冷却至室温。采用精度为 ±0.1 mg 的分析天平称取样品的氧化前质量(m_0)

和氧化后质量(m),计算氧化失重率 ΔW ($\Delta W = (m_0 - m)/m \times 100\%$),根据 ΔW 评价 SiC-ZrC 涂层 C/C 复合材料抗氧化性能。

2 结果与讨论

2.1 SiC-ZrC 涂层 C/C 复合材料组成和微观结构

图1是以 Al_2O_3 、 MgO 和 B_2O_3 三种氧化物作为包埋添加剂制得的复合材料试样表面 XRD 谱图。可以看出,试样表面主要由立方相 SiC 和 ZrC 组成。相比之下, Al_2O_3 作为添加剂的试样表面 SiC 和 ZrC 相的衍射峰相对强度明显更高,这表明 Al_2O_3 添加剂促进粉料扩散的效果优于 MgO 和 B_2O_3 。另外, B_2O_3 作为添加剂的试样 XRD 谱图中还出现了 C 的衍射峰,这可能是因为高温下 Si、Zr 和 C 反应生成 SiC 和 ZrC 的同时,液相 Si 和 B_2O_3 在流动过程中预先聚集,导致局部区域有过剩的 C 粉。谱图中未发现含有 Mg、B 和 Al 的相,这可能是因为 Mg、B 和 Al 易溶于 SiC 和 ZrC 中,并在高温下与 SiC 和 ZrC 形成置换固溶体,从而促进了 SiC 和 ZrC 在高温下的烧结致密化^[14]。

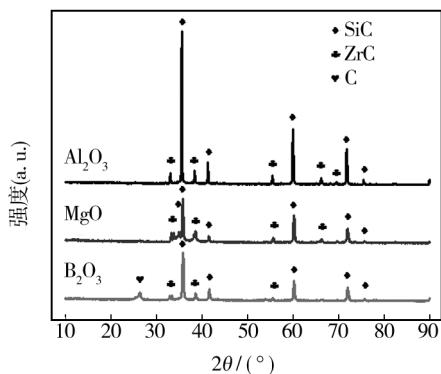


图1 SiC-ZrC 涂层 C/C 复合材料试样的 XRD 谱

Fig. 1 XRD patterns of the SiC-ZrC coated C/C composites

图2是三种氧化物作为包埋添加剂制得的复合材料试样表面 SEM 照片。如图 2a 所示, Al_2O_3 作为添加剂的复合材料试样表面涂层致密,没有发现明显的裂纹,但局部仍有少量大的孔洞存在。其放大的 SEM 照片(图 2b)中可见涂层颗粒大小均匀,平均粒径在 $2\ \mu\text{m}$ 左右,颗粒紧密堆积。对涂层颗粒的 EDS 分析(图 3)表明,灰色颗粒由 Si 和 C 两种元素组成,白色颗粒由 Zr 和 C 两种元素组成,结合前面的 XRD 分析(图 1)可知,涂层表面占绝大多数的灰色颗粒为

立方 SiC 相,而少量的白色颗粒为立方 ZrC 相。在高温下, Al_2O_3 参与了 SiC 的生成反应并伴有液相的形成^[15],因而降低了 Si 粉和 C 粉的表面能,促进了 Si 和 C 的扩散,加快了 SiC 的形成,同时液相形成也有利于减少涂层中的孔洞。

如图 2c 所示, B_2O_3 作为添加剂的复合材料试样表面有较多的凹坑,涂层较薄,能够看到碳纤维束的轮廓及取向。其放大的 SEM 照片(图 2d)中可看到碳纤维表面反应形成的连续、致密的涂层,但在涂层碳纤维之

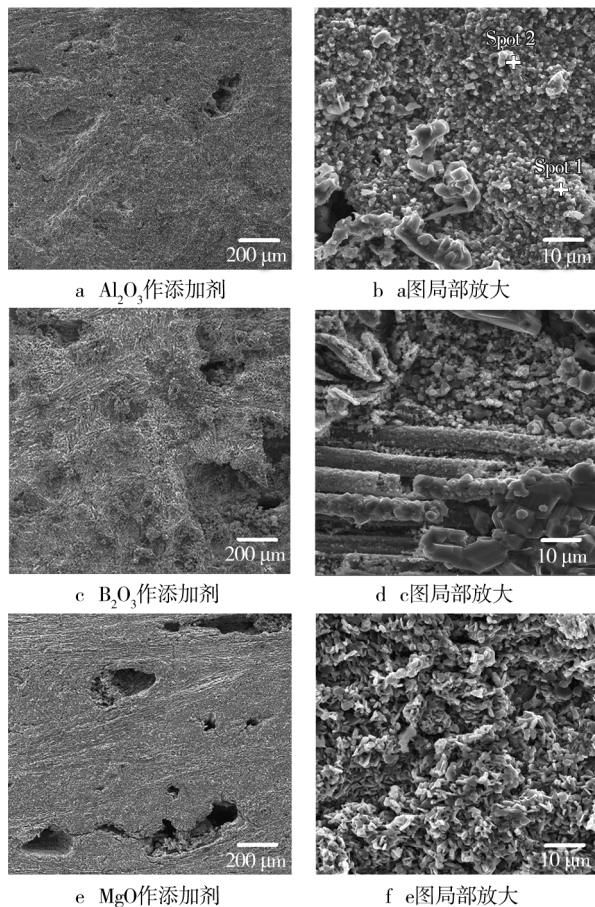


图2 SiC-ZrC 涂层 C/C 复合材料的 SEM 照片

Fig. 2 SEM images of the SiC-ZrC coated C/C composites

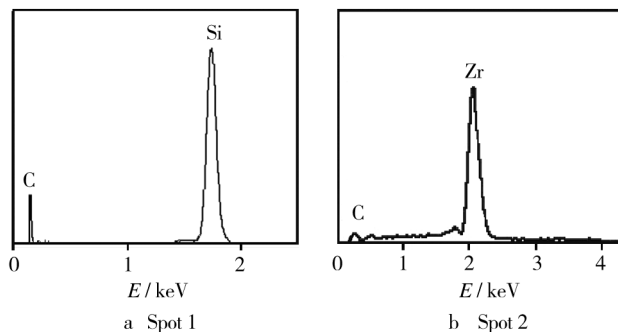


图3 图2b 对应位置的 EDS 分析

Fig. 3 EDS spectra from two spots in Fig. 2b

间的空隙内,颗粒堆积不太紧密,颗粒间存在较多间隙,并且局部区域存在 SiC 晶粒异常长大的现象。

如图 2e 和 f 所示,MgO 作为添加剂的试样表面涂层结构疏松,存在很多的孔洞和微裂纹。这表明以 MgO 作为包埋添加剂不利于形成结构致密的抗氧化涂层。

图 4 为三种氧化物作为包埋添加剂制得的复合材料试样截面微观形貌。从图 4a 和 b 可见,Al₂O₃ 作为添加剂的复合材料试样的表面涂层与 C/C 基体结合较好,没有开裂或剥落的现象,内部结构相对致密,无穿透性裂纹产生,平均厚度在 100 μm 左右。C/C 复合材料基体经过高温包埋处理后,内部大的孔洞被大量 SiC 和 ZrC 陶瓷相填充,孔洞尺寸明显减小,这表明 Al₂O₃ 添加剂对促进包埋粉料的扩散具有较好的效果。

B₂O₃ 作为添加剂的复合材料试样的表面涂层与 C/C 基体结合也比较好,但较薄,平均厚度在 10 μm

左右(图 4d)。复合材料内部反应形成的陶瓷相相对较少,内部大孔的陶瓷填充率很低(图 4c)。这表明 B₂O₃ 添加剂促进包埋粉料扩散的效果不佳。

MgO 作为添加剂的复合材料试样的表面涂层结构疏松,厚度在 40 μm 左右(图 4e)。C/C 复合材料经过高温包埋处理后内部也形成了较多的陶瓷相,这些陶瓷相主要分布在复合材料内部大的孔洞内(图 4f),这表明 MgO 添加剂对促进包埋粉料的扩散发挥了一定的作用,但它不能提高涂层的致密性。

2.2 SiC-ZrC 涂层 C/C 复合材料抗氧化性能

图 5 为以不同氧化物作为包埋添加剂制备的复合材料试样在不同温度下氧化 1 h 后的失重曲线。从图 5 可以看出,以 MgO 和 B₂O₃ 作为添加剂的复合材料试样的失重率随氧化温度的升高而逐渐增大,二者在 1550 ℃静态空气气氛中氧化 1 h 后的失重率分别达到 36%,15%。在实验温度范围内,SiC 和 ZrC 的氧化是增重的过程,而 C/C 基体的氧化是失重的过程,这两种复合材料试样氧化失重率的增加表明材料内部的基体炭一直处于氧化烧蚀状态,SiC-ZrC 涂层对基体材料的防护作用非常有限。与以 MgO 和 B₂O₃ 作为添加剂不同,以 Al₂O₃ 作为包埋添加剂制备的复合材料试样的失重率随氧化温度的升高而逐渐降低,在 1000 ℃的氧化失重率为 18%,而在 1550 ℃的氧化失重率仅为 1%。这表明以 Al₂O₃ 作为包埋添加剂制备的 SiC-ZrC 涂层对 C/C 基体的防护能力随温度的升高而增强。

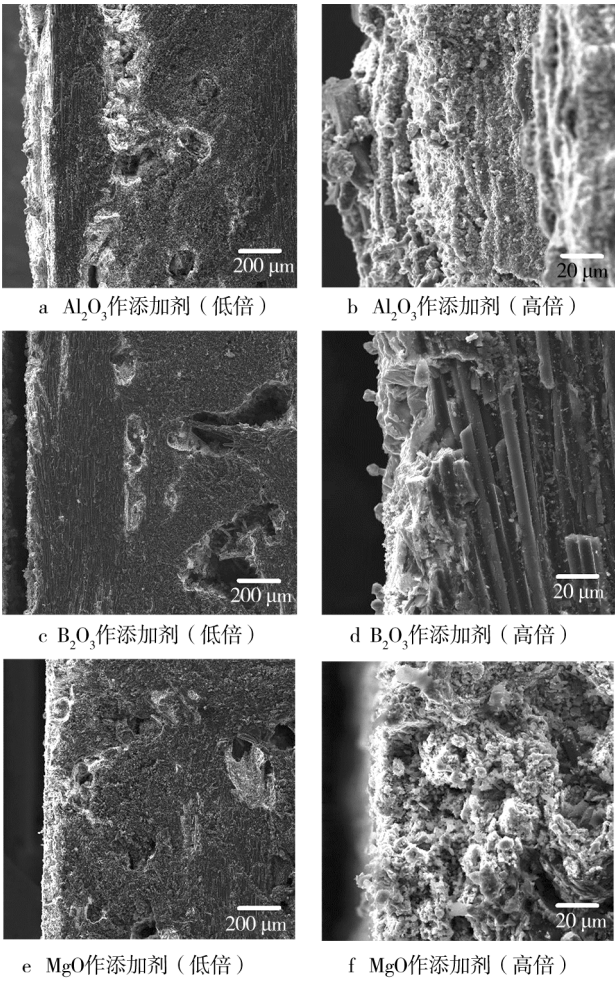


图 4 SiC-ZrC 涂层 C/C 复合材料试样截面形貌

Fig.4 Cross-sectional morphologies of the SiC-ZrC coated C/C composites

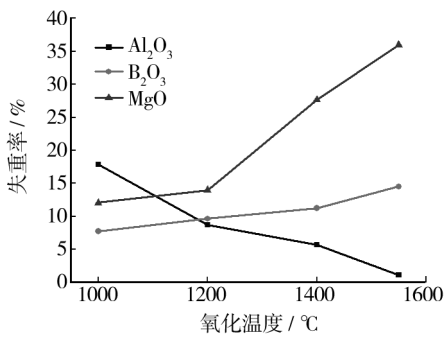


图 5 SiC-ZrC 涂层 C/C 复合材料试样氧化失重曲线

Fig.5 Oxidation curves of the SiC-ZrC coated C/C composites

为了进一步探索三种氧化物添加剂制备的 SiC-ZrC 涂层 C/C 复合材料的高温氧化行为,对氧化后试样表面的组成和微观结构进行了分析。图 6 是在 1500 ℃空气气氛中氧化 1 h 后的 XRD 谱图,可以看出,氧化后的复合材料试样表面主要由 SiO₂,ZrO₂,SiC 及少量 ZrSiO₄ 组成。以 MgO 作为包埋添加剂制

备的复合材料试样氧化后,表面 SiO_2 衍射峰的相对强度明显高于其他两种试样,这表明由 MgO 添加剂制备的试样表面大部分 SiC 氧化转变成了 SiO_2 ,而由 Al_2O_3 和 B_2O_3 添加剂制备的试样表面只有少部分 SiC 发生氧化。与 SiC 相比, ZrC 更易氧化,因此三种氧化物添加剂制备的复合材料试样氧化后都没有发现残余的 ZrC 相。试样氧化后表面出现的 ZrSiO_4 相可能是由 SiO_2 和 ZrO_2 在高温下反应形成的,它的形成可以进一步改善 SiO_2 的稳定性^[7]。

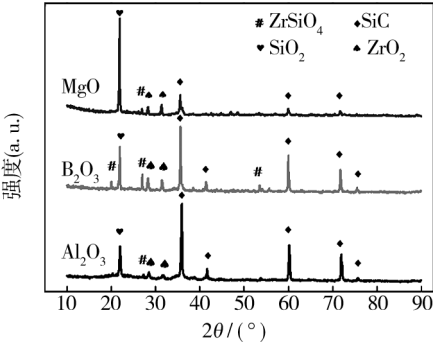
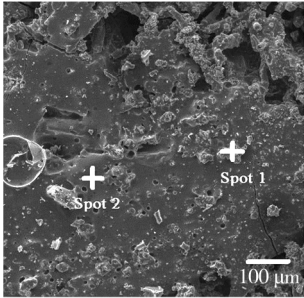


图 6 SiC-ZrC 涂层 C/C 复合材料试样氧化后的表面 XRD 谱图
Fig.6 XRD patterns of the surface of the SiC-ZrC coated C/C composites after oxidation in air

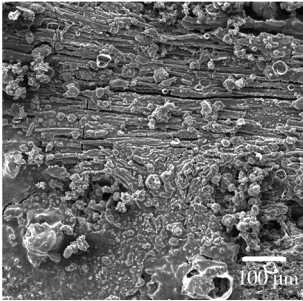
图 7 是三种氧化物包埋添加剂制备的 SiC-ZrC 涂层 C/C 复合材料在 1550 ℃ 空气气氛中氧化 1 h 后的表面微观形貌。从图 7a 可以看出,以 Al_2O_3 作为包埋添加剂制备的复合材料试样氧化后,表面形成了一层连续的玻璃膜,玻璃膜中存在大量气孔和少量微裂纹。EDS 分析(图 8)表明,玻璃膜由 Si, O 和 C 三种元素组成,结合 XRD 分析可知,玻璃膜的主要成分为 SiO_2 和 SiC 。复合材料表面氧化形成的连续玻璃膜可以在一定程度上阻挡氧的扩散,通过降低氧气向 C/C 基体扩散的速率,实现对 C/C 基体的防护,因而表现出相对较好的抗氧化性能。玻璃膜中气孔的形成可能与 SiC , ZrC 以及基体炭氧化产生的 CO 和 CO_2 气体逸出有关。除气孔和微裂纹以外,玻璃膜的表面还附着有一些颗粒状物质,EDS 分析表明它们由 Zr, Si 和 O 三种元素组成,结合 XRD 分析可知,这些物质主要成分为 ZrO_2 和 ZrSiO_4 。

从图 7b 可以看出,以 B_2O_3 作为包埋添加剂制备的复合材料氧化后,表面也有玻璃膜形成,但玻璃膜比较薄,并且不连续,局部区域可以观察到纤维轮廓。玻璃膜表面附着有大量的粗糙颗粒,内部存在大量裂纹和孔洞等缺陷,为氧气的扩散提供了通道,因而复合材料的抗氧化性能不佳。从图 7c 可以看出,以

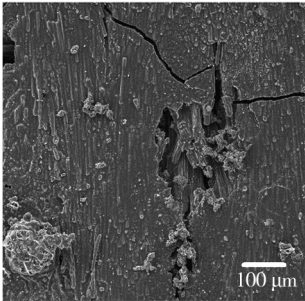
MgO 作为包埋添加剂制备的复合材料氧化后,表面形成的玻璃膜也比较薄,并且出现了较大尺寸的裂纹和孔洞,氧气可以通过这些裂纹和孔洞快速扩散到达 C/C 基体,造成基体的氧化和烧蚀,外部涂层因此几乎丧失氧化防护的能力,表现为复合材料的抗氧化性能较差。



a Al_2O_3 作添加剂



b B_2O_3 作添加剂



c MgO 作添加剂

图 7 SiC-ZrC 涂层 C/C 复合材料试样氧化后的表面 SEM 照片
Fig.7 SEM images of the SiC-ZrC coated C/C composites after oxidation

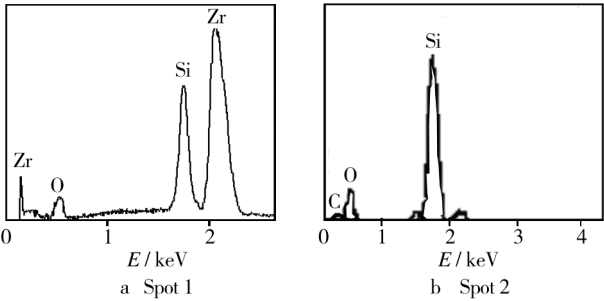


图 8 图 7a 对应位置的 EDS 分析
Fig.8 EDS spectra from two spots in Fig.7a

3 结论

1) 以 Al_2O_3 作为包埋添加剂在 C/C 复合材料表面制得的 SiC-ZrC 涂层最为致密,厚度在 100 μm 左右;以 B_2O_3 作为添加剂制得的涂层较致密,厚度在 10 μm 左右;而以 MgO 作为添加剂制得的涂层较疏松,厚度在 40 μm 左右。

2) 与 B_2O_3 添加剂相比, Al_2O_3 和 MgO 添加剂更能促进包埋粉料的扩散,使 SiC 和 ZrC 陶瓷相更易在 C/C 复合材料的内部孔隙中形成。

3) 在 1000 ~ 1550 °C 的静态空气气氛中,随着氧化温度的升高,以 Al_2O_3 作为添加剂的复合材料失重率逐渐减小,在 1550 °C 氧化 1 h 后仅为 1%;以 B_2O_3 和 MgO 作为添加剂的复合材料失重率逐渐增加,在 1550 °C 氧化 1 h 后分别达到 15% 和 36%。

参考文献

- [1] 薛晖,李贺军,付前刚,等. 炭/炭复合材料 SiC-MoSi₂/SiC 涂层结构及防氧化性能研究[J]. 固体火箭技术,2008,31(6):638—641.
- XUE Hui, LI He-jun, FU Qian-gang, et al. Microstructure and Anti-oxidation Properties of SiC-MoSi₂/SiC Coating for C/C Composites[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2008,31(6):638—641.
- [2] 刘建军,李铁虎,郝志彪,等. 炭/炭复合材料表面等离子喷涂钨涂层结构与性能研究[J]. 表面技术,2003,32(3):28—30.
- LIU Jian-jun, LI Tie-hu, HAO Zhi-biao, et al. Study on Structure and Performance of Plasma Spraying Tungsten Coatings on Carbon-Carbon Composites[J]. Surface Technology, 2003,32(3):28—30.
- [3] 侯克社,李克智,李贺军,等. C/C 复合材料 SiC-TaSi₂/MoSi₂ 抗氧化复合涂层研究[J]. 金属学报,2008,44(3):331—335.
- HOU Dang-she, LI Ke-zhi, LI He-jun, et al. Study on the SiC-TaSi₂/MoSi₂ Multilayer Oxidation Protective Coating for Carbon/Carbon Composites[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2008,44(3):331—335.
- [4] 侯克社,李克智,李贺军,等. 硅钼含量对 C/C 复合材料 SiC-MoSi₂ 涂层结构和高温抗氧化性能的影响[J]. 固体火箭技术,2008,31(3):283—286.
- HOU Dang-she, LI Ke-zhi, LI He-jun, et al. Effect of Si/Mo Ratio on Microstructure and High-temperature Anti-oxidation Property of SiC-MoSi₂ Coating for Carbon/Carbon Composites[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2008,31(3):283—286.
- [5] 杨鑫,邹艳红,黄启忠,等. Mo₅Si₃-MoSi₂/SiC 复合涂层的高温抗氧化行为分析[J]. 复合材料学报,2009,26(4):119—125.
- YANG Xin, ZOU Yan-hong, HUANG Qi-zhong, et al. Analysis on the Oxidation Behavior of Mo₅Si₃-MoSi₂/SiC Multicoating at High Temperature[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2009,26(4):119—125.
- [6] 朱勤旺,罗瑞盈. 新型 SiC-MoSi₂/Al-O-Ti 炭/炭抗氧化复合涂层的制备及其性能研究[J]. 表面技术,2011,40(6):14—17.
- ZHU Qin-wang, LUO Rui-ying. Study on the Preparation and Performance of New SiC-MoSi₂/Al-O-Ti Multi Anti-oxidation Coating for C/C Composites[J]. Surface Technology, 2011,40(6):14—17.
- [7] 赵娟,王贵,刘朗,等. SiC 涂层对不同碳基体氧化防护行为的研究[J]. 表面技术,2007,36(2):1—3.
- ZHAO Juan, WANG Gui, LIU Lang, et al. Oxidation Protective Behavior of SiC Coating for Different Carbon Matrix[J]. Surface Technology, 2007,36(2):1—3.
- [8] 冉丽萍,易茂中,蒋建献,等. 炭/炭复合材料高温抗氧化 MoSi₂/SiC 复合涂层及其抗氧化特性[J]. 复合材料学报,2005,22(6):15—20.
- RAN Li-ping, YI Mao-zhong, JIANG Jian-xian, et al. MoSi₂/SiC High Temperature Anti-oxidation Compound Coating on Carbon/Carbon Composites and Its Anti-oxidation Behavior[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2005,22(6):15—20.
- [9] 蒋建献,易茂中,葛毅成,等. 炭/炭复合材料 MoSi₂/SiC 抗氧化涂层的研究[J]. 炭素技术,2004,23(3):5—9.
- JIANG Jian-xian, YI Mao-zhong, GE Yi-cheng, et al. Investigation of Anti-oxidation of MoSi₂/SiC Coating on Carbon-Carbon Composites[J]. Carbon Techniques, 2004,23(3):5—9.
- [10] TANG S F, DENG J Y, WANG S J, et al. Ablation Behaviors of Ultrahigh Temperature Ceramic Composites[J]. Materials Science and Engineering A, 2007,465(1/2):1—7.
- [11] ZOU L H, WALI N, YANG J M, et al. Microstructural Development of a Cf/ZrC Composite Manufactured by Reactive Melt Infiltration[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2010,30:1527—1535.
- [12] 曾毅,张武装,熊翔. C/C 复合材料 SiC/ZrB₂-MoSi₂ 复合涂层的抗氧化机制[J]. 复合材料学报,2010,27(3):50—55.
- ZENG Yi, ZHANG Wu-zhuang, XIONG Xiang. Anti-oxidation Mechanism of the SiC/ZrB₂-MoSi₂ Coating on the Carbon/Carbon Composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2010,27(3):50—55.
- [13] FENG T, 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.
- [14] 史小红,李贺军,付前刚,等. 不同氧化物对 C/C 复合材料 SiC 涂层性能的影响[J]. 新型炭材料,2009,24(1):45—49.
- SHI Xiao-hong, LI He-jun, FU Qian-gang, et al. Effect of Different Oxide Additives on the Properties of a SiC Coating on Carbon/Carbon Composites[J]. New Carbon Materials, 2009,24(1):45—49.
- [15] GUO J Y, GITZHOFFER F, BOULOS M I. Study of the Sintering Properties of Plasma Synthesized Ultrafine SiC Powders[J]. Journal of Materials Science, 1997,32:5257—5269.