

轻质 C_f/SiOC 复合材料表面抗氧化涂层 烧蚀性能的研究

杜斌, 洪长青, 张幸红

(哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150001)

摘要: **目的** 提高轻质碳纤维增强 SiOC (C_f/SiOC) 多孔陶瓷复合材料的抗烧蚀性能。**方法** 用 TaSi₂、MoSi₂ 为高温抗氧化组分, SiB₆ 为烧结助剂, 硼硅酸玻璃为粘结剂, 采用浆料法在 C_f/SiOC 复合材料表面制备多层梯度化抗氧化涂层。用氧乙炔考核带涂层复合材料的抗氧化及抗烧蚀性能, 并通过扫描电子显微镜对烧蚀后的形貌进行分析。**结果** 采用硼硅酸玻璃能够在较低的温度下获得表面致密的涂层, 有效地提升涂层的阻氧能力, 同时能够降低涂层与基体材料之间的热失配。通过浆料法能够获得梯度化的抗氧化涂层, 即涂层由靠近基体部分的多孔层逐渐过渡至最外层的致密层。在氧乙炔考核烧蚀实验下, 涂层表现出优良的抗烧蚀性能, 并且随着表面烧蚀温度的不同, 表现出不同的烧蚀行为。在 1660 °C 下烧蚀后, 线烧蚀率及质量烧蚀率分别为 0.03 μm/s, 2.96×10⁻⁸ g/(mm²·s), 随着烧蚀温度增加至 1760 °C, 线烧蚀率及质量烧蚀率增加至 0.06 μm/s, 1.03×10⁻⁷ g/(mm²·s)。带涂层的复合材料烧蚀后, 涂层表面没有裂纹, 但都出现了大量的孔洞, 其主要原因是硼硅酸玻璃的挥发, 基体材料并没有发生明显的氧化, 涂层表现出优良的抗氧化、阻氧能力。**结论** 硼硅酸玻璃的引入能够在较低的温度下获得表面致密的涂层, 提升涂层的阻氧能力。制备的多组分抗氧化烧蚀涂层, 可以有效地提高 C_f/SiOC 复合材料的抗烧蚀能力。

关键词: C_f/SiOC 复合材料; 陶瓷涂层; TaO₂; 硼硅玻璃; 烧蚀性能

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.10.008

中图分类号: TG174.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2019)10-0049-06

Ablation Performance of Anti-oxidation Coatings on Surface of Lightweight C_f/SiOC Composite

DU Bin, HONG Chang-qing, ZHANG Xing-hong
(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

ABSTRACT: Objective To improve the ablation resistance property of lightweight carbon fiber reinforced SiOC ceramics (C_f/SiOC). **Methods** With TaSi₂ and MoSi₂ as high temperature antioxidant components, SiB₆ as sintering assistant and borosilicate glass as binder, multilayer gradient antioxidant coating was prepared on C_f/SiOC composite surface by slurry method. The anti-oxidation and ablative properties of the composite material with coating were tested by oxy-acetylene. And its morphology after morphology was analyzed with SEM. **Results** Borosilicate glass can obtain a compact coating at low temperature, which can effectively improve the oxygen resistance of the coating and reduce the thermal mismatch between the coating and the substrate. The gradient oxidation resistant coating can be obtained by the slurry method, that was, the coating gradually tran-

收稿日期: 2019-05-30; 修订日期: 2019-06-24

基金项目: 国家自然科学基金 (11572353, 11121061, 91216301)

作者简介: 杜斌 (1989—), 男, 武威人, 博士研究生, 主要研究方向为抗氧化涂层。

通讯作者: 张幸红 (1972—), 男, 桐城人, 博士, 教授, 主要研究方向为超高温涂层。

sited from the porous layer close to the substrate to the densest layer. In the assessment of oxyacetylene ablation experiments, the coating showed excellent ablation resistance, and the ablation behavior was different with different ablation surface temperature. After ablation at 1660 °C, linear ablation rate and quality ablation rate were 0.03 $\mu\text{m/s}$, $2.96 \times 10^{-8} \text{ g}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})$; as the ablation temperature increased to 1760 °C, the linear ablation rate and quality of ablation rate were increased to 0.06 $\mu\text{m/s}$, $1.03 \times 10^{-7} \text{ g}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})$. After ablative erosion of composite materials with coating, there were no cracks on the surface of coating, but a large number of holes appeared. The main reason was the volatilization of borosilicate glass. The base material did not undergo obvious oxidation, and the coating showed excellent oxidation resistance ability. **Conclusion** The introduction of borosilicate glass can obtain a compact surface coating at low temperature and improve the oxygen resistance of the coating. The prepared multicomponent antioxidant ablative coating can effectively improve the ablation resistance of C_f/SiOC composite.

KEY WORDS: C_f/SiOC composites; ceramics coating; TaO_2 ; borosilicate glass; ablation performance

近年来,临近空间特殊的战略价值已成为大国之间相互博弈的重要手段,以可重复使用的轨道机动式、高超声速助推滑翔式和高超声速巡航式 as 典型代表的高超声速飞行器成为各国竞相研究的热点。美国、俄罗斯、欧洲及日本等国家和地区先后投入大量的经费,并制定了一系列研究计划,积极开展高超声速飞行器的研制。高超声速飞行器在飞行过程中,由于高速气流经过激波层受到压缩,大量的动能转换为热能,导致飞行器表面局部温度超过 1800 °C。同时面临大温度梯度及强氧化环境,一旦关键热构件受到热力冲击破坏或烧蚀引起钝化,将会极大地影响飞行器的升阻比,对飞行器的快速远程输送、精确打击及远程实时侦查带来消极的影响。因此,极端环境下具有优异耐温性、耐久性及高可靠性的防/隔热复合材料/结构是保障飞行器再入、在轨服役和安全返回地球的关键技术之一^[1-5]。其中涉及氧化烧蚀、强辐射、高真空、微重力、质子流及紫外线等复杂环境,具有显著的多学科交叉特点。纵观国内外最新航天飞行器的发展现状,航天复合材料总体发展趋势是耐高温、轻量化、低成本和多功能化,而材料微结构设计、材料体系和制备方法创新发展将在未来航天复合材料的发展中发挥不可或缺的主导作用^[6-9]。

针对可重复使用防/隔热一体化材料的需求,NASA Ames 研究中心研制出了具有“轻质、强韧化、耐高温、抗氧化”的整体增强抗氧化复合结构(TUFROC),并成功应用于 X-37B 空天飞机。这种复合结构主要由两部分组成:表面由带有高辐射、抗氧化涂层的多孔碳纤维隔热瓦及陶瓷纤维隔热瓦组成,该结构整体密度为 $0.4 \text{ g}/\text{cm}^3$,耐温能达到 1700 °C,并可重复使用。TUFROC 作为新一代防/隔热一体复合材料的典型代表,不仅克服了早期陶瓷纤维隔热瓦的脆性问题,而且在抗氧化及可靠性等方面的性能得到了很大提升。近年来,国内热防护领域相关单位也相继开展了轻质防/隔热一体化复合材料的研制工作,主要有航天材料及工艺研究所、北京理工大学、哈尔滨工业大学及国防科学技术大学等^[10-15]。

王辉等人^[16]在多孔碳纤维增强陶瓷基复合材料

表面设计制备了双层结构陶瓷涂层,并且采用氧-乙炔对涂层进行了烧蚀实验。结果表明,该双层涂层在 1500 °C 时具有良好的抗烧蚀性能,氧化烧蚀过程中,涂层表面形成了 ZrO_2 及 ZrSiO_4 等耐烧蚀相,有效地保护了基体材料。Li 等人^[17]在多孔 SiOC 陶瓷表面制备了一层含氧化铝的 $\text{TaSi}_2\text{-MoSi}_2$ -硼硅酸玻璃涂层,在 1600 °C 的温度下氧化 20 min 时,该材料表现出优异的抗氧化性能。其主要原因是随着氧化铝的引入,提高了硼硅酸玻璃的黏度,降低了高温下的挥发速率。Xu 等人^[18]在碳纤维隔热瓦表面制备了由 Si-CBCF 内层到致密的 $\text{HfB}_2\text{-MoSi}_2$ 梯度涂层,并采用电弧风洞考核了带涂层复合材料的抗氧化烧蚀性能。结果表明,该涂层具有优异的抗氧化及抗热冲击性能,氧化过程中形成的 HfO_2 颗粒镶嵌在 SiO_2 玻璃相中,明显提高了涂层的烧蚀性能。Tao 等人^[19]在石英纤维隔热瓦表面制备了一层 $\text{MoSi}_2\text{-SiC}$ 涂层,并研究了涂层的辐射特性。结果表明,该涂层的发生率高于 0.85,表现出优异的抗氧化性能。

从以上分析看出,为提高碳纤维基复合材料在高温有氧环境下的可靠性,涂层法是目前普遍认为最具有潜力的一种措施。从涂层成分来看,主要包括硼化物、碳化物、硅化物基超高温陶瓷,并且单一的组分并不能完全满足基体材料在全温区的抗氧化需求,逐渐向多组分、多元化的方向发展。前期,笔者课题组采用喷涂法在碳纤维隔热表面制备了 ZrB_2 基抗氧化涂层,静态氧化结果表明,双层涂层比单层涂层具有更优异的抗氧化性能。采用氧-乙炔考核表明,烧蚀过程中,涂层表面形成的 SiO_2 玻璃逐渐减少, ZrO_2 的含量逐渐增加,该涂层表现出优异的抗氧化烧蚀性能。进一步地,在碳纤维隔热瓦表面制备了 TaSi_2 基抗氧化烧蚀涂层,并研究了涂层的发生率,发现含 TaSi_2 的致密涂层具有更加稳定的高温发射率。设计并制备了由多孔向致密过渡的梯度化抗氧化烧蚀涂层,对带涂层的复合材料在高频等离子电弧风洞考核。结果表明,热流密度从 $103.04 \text{ W}/\text{cm}^2$ 增加至 $225 \text{ W}/\text{cm}^2$,烧蚀时间从 1000 s 增加至 1500s,试样表面的温度从 1341 °C 增加至 1527 °C,复合材料的烧

蚀率从 $1.23 \times 10^{-6} \text{ g}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})$ 增加至 $9.39 \times 10^{-6} \text{ g}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})$, 表现出优异的抗氧化能力^[20]。然而, 当进一步提高热流密度及动压时, 带涂层复合材料在高动压环境下的抗冲刷能力较差, 主要表现出基体材料的剥离及涂层表面大量凹坑。其主要原因是碳纤维隔热瓦基体材料的力学性能较差, 导致高动压环境下基体材料失效。因此, 如何进一步提升带涂层复合材料在高热流、高动压环境下的抗氧化、抗冲刷能力是目前面临的难题之一。

文中采用轻质碳纤维增强多孔 SiOC 陶瓷基复合材料 (C_f/SiOC) 为基体, 采用喷涂法在其表面制备由多孔层逐渐向致密层过渡的梯度化抗氧化涂层。通过氧-乙炔考核, 采用 XRD、SEM 等检测手段研究了带涂层复合材料的抗氧化烧蚀性能及烧蚀机理。

1 试验

1.1 涂层制备

将 C_f/SiOC 基体材料 (密度为 $0.67 \text{ g}/\text{cm}^3$) 加工为 $\phi 30 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的圆柱, 用乙醇超声清洗后烘干备用。设计梯度化抗氧化涂层, 以多孔 MoSi₂-SiC-SiB₆-硼硅玻璃为内层, 致密 TaSi₂-MoSi₂-SiC-SiB₆-硼硅玻璃为外层, 各组分的含量见表 1。涂层的制备流程如下: 将 C_f/SiOC 基体浸渍在内层涂层浆料中, 使内层浆料能够充分地渗入基体内部, 之后烘干; 采用喷涂法将内层涂层喷涂在 C_f/SiOC 复合材料表面, 烘干后将其包埋与石墨粉中, 直接放置于 $1450 \text{ }^\circ\text{C}$ 的马弗炉中烧结 15 min 后, 取出冷却至室温; 将外层涂层再喷涂于上述复合材料表面, 烘干后, 直接放置于 $1450 \text{ }^\circ\text{C}$ 的马弗炉中烧结 15 min 后, 取出冷却至室温, 获得带涂层的复合材料。

表 1 涂层各组分含量 %

	去离子水	TaSi ₂	MoSi ₂	硼硅玻璃	SiB ₆	SiC _{nw}
内层	100	0	57	40	2	1
外层	100	27	43.4	20	2	7.6

1.2 烧蚀性能测试

1) 采用氧-乙炔考核带涂层的复合材料的氧化烧蚀性能。在烧蚀过程中, 控制 O₂ 及 C₂H₂ 的压力分别为 0.4 MPa 和 0.095 MPa 。火焰枪口与试样的角度为 90° , 距离为 80 mm 。因此, 线烧蚀率和质量烧蚀率可根据式 (1) 及式 (2) 获得。

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

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

式中: Δd 为试样烧蚀前后厚度的变化, μm ; Δm

为烧蚀前后质量的变化, g ; A 为烧蚀面积, mm^2 ; t 为烧蚀时间, s 。

2) 采用扫描电子显微镜 (SEM, Helions Nanolab600i) 观察涂层表面及截面形貌。

3) 采用 X-射线衍射仪 (XRD, Rigaku D/max-3C) 检测试样烧蚀前后的物相变化情况。

2 结果及分析

2.1 烧蚀前涂层表面形貌及烧蚀率

涂层在不同温度下烧蚀前后的表面形貌如图 1 所示。从图 1 a、b 可以看出, 烧蚀前涂层表面均没有明显的裂纹, 表现出玻璃光泽, 说明该涂层表面致密度较高。其主要原因是该涂层体系中添加了低温下能够形成液相的硼硅酸玻璃, 在烧结过程中, 硼硅酸玻璃形成液相, 弥合了其他陶瓷涂层之间的空隙, 从而形成具有玻璃光泽的表面。带涂层的复合材料在不同温度下烧蚀后表现出不同的形貌: 当烧蚀温度为 $1660 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 涂层表面的玻璃光泽消失, 形成白色的表面; 当温度为 $1760 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 表面形成大量的气孔, 说明在该温度下, 涂层表面的物质大量挥发, 从而形成了大量的孔洞。从烧蚀后涂层的线烧蚀率及质量烧蚀率 (见表 2) 也进一步说明了随着温度的增加, 涂层的质量烧蚀率及线烧蚀率逐渐增加。线烧蚀率由 $1660 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的 $0.03 \mu\text{m}/\text{s}$ 增加至 $1760 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的 $0.06 \mu\text{m}/\text{s}$;

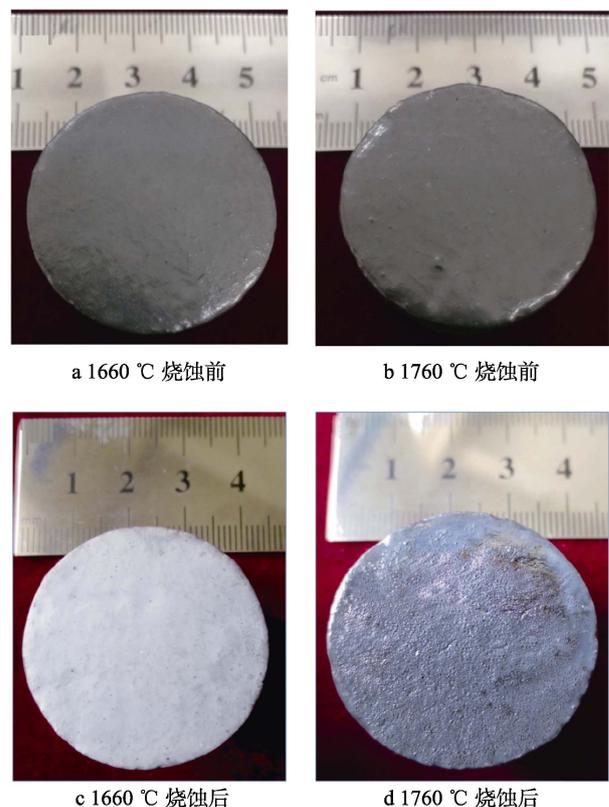


图 1 带涂层的复合材料在不同表面温度下烧蚀前后的宏观照片

质量烧蚀率由 1660 °C 时的 $2.96 \times 10^{-8} \text{ g}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})$ 增加至 1760 °C 时的 $1.03 \times 10^{-7} \text{ g}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})$ 。

表 2 烧蚀表面温度、烧蚀时间及烧蚀率

	最高温度/°C	烧蚀时间/s	质量烧蚀率/ $(\text{g} \cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	线烧蚀率/ $(\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
1	1660	1000	2.96×10^{-8}	0.03
2	1760	1000	1.03×10^{-7}	0.06

2.2 涂层表面及截面形貌

涂层在烧蚀前表面及截面及烧蚀后的表面 SEM 照片如图 2 所示。从图 2a 中可以看出, 烧蚀前涂层表面致密, 没有明显的裂纹及孔洞, 这与之前的分析相吻合。说明采用硼硅玻璃能够在较低的温度及较短的烧结时间下使涂层表面致密, 从而提高涂层的阻氧

能力。从烧蚀前的截面照片 (见图 2b) 可以看出, 烧蚀前涂层主要由靠近基体部分的多孔层以及表面的致密层组成, 该梯度结构与涂层结构设计相吻合。由于涂层与基体较大的热失配, 在温度交替变化过程中, 由于收缩的不同, 容易造成涂层的开裂或剥离, 而采用该梯度结构, 靠近基体部分形成多孔层, 能够有效地阻止裂纹扩展, 在较大的温度梯度下, 提高涂层的抗热冲击性能。从烧蚀后的表面形貌可以看出, 当表面温度为 1660 °C 时, 涂层表面形成大量的孔洞, 相比于 1760 °C 时, 形成的孔洞较小, 而烧蚀温度为 1760 °C 时, 形成较大的孔洞。这说明当温度超过 1600 °C 时, 涂层表面大量的玻璃相挥发, 从而形成孔洞。当温度进一步增加时, 玻璃相的黏度降低, 在烧蚀气流的剪切作用下, 更容易在表面形成较大的烧蚀坑。

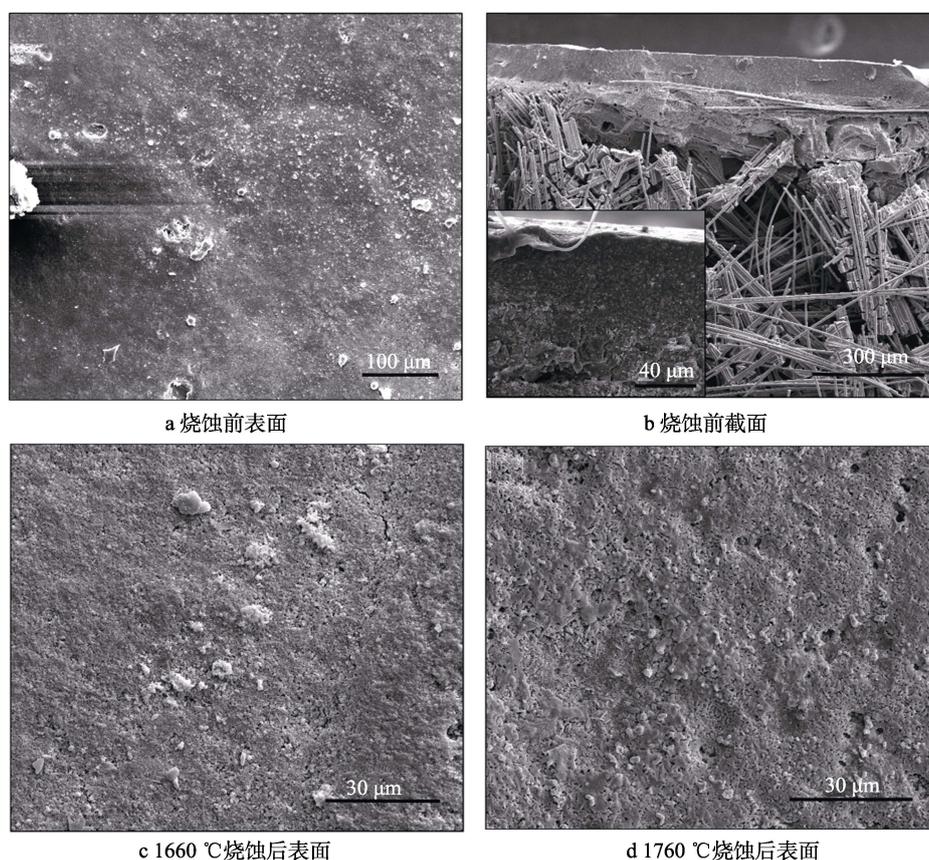
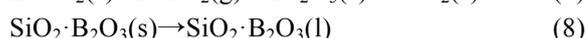
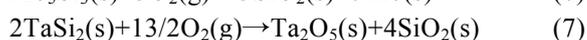
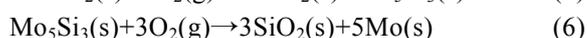
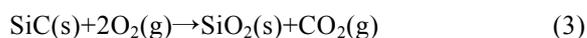


图 2 涂层烧蚀前及烧蚀后 SEM 照片

烧蚀后涂层的截面形貌如图 3 所示。可以看出, 在较低的温度下, 带涂层的复合材料表现出优异的抗烧蚀能力。在 1660 °C 下烧蚀 1000 s 后, 涂层的厚度降低至 200 μm 左右, 但是碳纤维基体部分仍保持良好的状态, 并没有发生烧蚀。这说明该涂层在 1660 °C 时, 具有优异的阻氧能力。然而, 当表面烧蚀温度增加至 1760 °C 时, 涂层的厚度进一步降低, 并且涂层与基体的界面并不明显。说明在该温度下, 涂层的烧蚀较大, 造成涂层在厚度方面明显下降。此外, 靠近

涂层的基体部分并没有发现碳纤维的烧蚀现象, 进一步证明了该涂层具有优异的抗烧蚀能力。在烧蚀过程中, 涂层中的主要发生如下氧化反应^[21]:



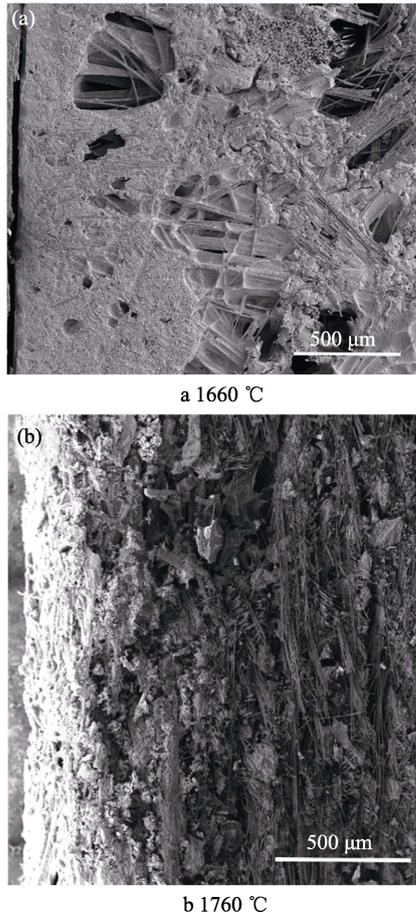


图 3 涂层烧蚀后截面 SEM 照片

该涂层具有优异的阻氧能力主要是通过添加多组分镶嵌结构, 利用硼硅酸玻璃具有较低的熔点, 能在较低的温度下形成液相, 使得涂层表面迅速致密化, 提升涂层的阻氧能力。此外, 利用 MoSi₂ 及 TaSi₂ 高温自愈及抗烧蚀能力, 在高温下氧化形成 SiO₂ 玻璃相及 Ta₂O₅, 一方面能够迅速弥合涂层表面的微裂纹; 另一方面提升涂层的抗烧蚀能力, 从而使该涂层具有优异的抗烧蚀能力。

3 结论

1) 用 MoSi₂、TaSi₂、SiB₆ 及硼硅酸玻璃在 C_f/SiOC 多孔陶瓷基复合材料表面制备了梯度化抗氧化涂层, 硼硅酸玻璃的引入有效地提升了涂层表面的致密度。

2) 采用氧乙炔考核了带涂层复合材料的烧蚀性能, 结果表明, 在不同的烧蚀温度下, 涂层表现出不同的烧蚀表面。

3) 在表面温度为 1660 °C 下烧蚀后, 线烧蚀率及质量烧蚀率分别为 0.03 μm/s, 2.96×10⁻⁸ g/(mm²·s)。随着烧蚀温度增加至 1760 °C, 线烧蚀率及质量烧蚀率增加至 0.06 μm/s, 1.03×10⁻⁷ g/(mm²·s)。

4) 带涂层的复合材料烧蚀后, 涂层表面没有裂纹, 但都出现了大量的孔洞。其主要原因是硼硅酸玻

璃的挥发, 基体材料并没有发生明显的氧化, 涂层表现出优良的阻氧能力。

参考文献:

- [1] 陈玉峰, 洪长青, 胡成龙, 等. 空天飞行器用热防护陶瓷材料[J]. 现代技术陶瓷, 2017, 38(5): 311-390.
- [2] 杜善义, 方岱宁, 孟松鹤, 等. “近空间飞行器的关键基础科学问题”重大研究计划结题综述[J]. 中国科学基金, 2017(2): 109-114.
- [3] 周长灵, 徐鸿照, 朱杉, 等. 盖板式热防护系统研究现状及发展趋势[J]. 现代技术陶瓷, 2016, 37(3): 220-226.
- [4] COOPER P A, HOLLOWAY P F. The Shuttle tile story[J]. *Astronautics & Aeronautics*, 1981, 19(1): 24-36.
- [5] STEWART D, LEISER D. Lightweight TUFROC TPS for Hypersonic Vehicles[C]// 14th AIAA/AHI Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference. Canberra, Australia, 2006.
- [6] 刘琛. SiOC 基陶瓷改性碳纤维骨架复合材料及其抗氧化涂层研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [7] 徐宝升. ZrB₂-基陶瓷改性碳粘结碳纤维复合材料及其抗氧化涂层研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [8] 武勇斌, 赫晓东, 李军. 陶瓷隔热瓦表面 SiO₂-B₂O₃-MoSi₂-SiB₄ 涂层的制备与性能研究[J]. 航天制造技术, 2012(5): 6-9.
- [9] TONG C, CHENG L, YIN X, et al. Oxidation Behavior of 2D C/SiC Composite Modified by SiB₄ Particles in Inter-bundle Pores[J]. *Composites Science & Technology*, 2008, 68(3): 602-607.
- [10] FAN S, HE L, YANG C, et al. Effect of B₄C on the Microstructure and Properties of B₄C Modified Three-dimensional Needled C/C-SiC Composites[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2017, (706): 201-210.
- [11] WANG Z, ZENG F, LI Y, et al. Self-healing Effect and Oxidation Resistance of ZrSiO₄-glass Coating for C/C Composites at 1173K-1573K[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 792: 496-504.
- [12] WANG P, LI H, SUN J, et al. The Effect of HfB₂ Content on the Oxidation and Thermal Shock Resistance of SiC Coating[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2018, 339: 124-131.
- [13] FENG X, WANG X, LIU Y, et al. Oxidation Behavior of Plasma-sprayed ZrB₂-SiC Coatings[J]. *Ceramics International*, 2018, 45: 2385-2392.
- [14] 付前刚. SiC 晶须增韧硅化物及 SiC/玻璃高温抗氧化涂层的研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007
- [15] HUANG J, ZHOU L, CAO L, et al. Effect of the Incorporation of SiC Nanowire on Mullite/SiC Protective Coating for Carbon/Carbon Composites [J]. *Corrosion Science*, 2016(17): 85-95
- [16] 王辉, 王焕宁, 朱时珍, 等. 多孔碳纤维增强陶瓷基复

- 合材料抗氧化烧蚀涂层的制备及性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(S1): 165-169.
- [17] LI X, FENG J, JIANG Y, et al. Preparation and Anti-oxidation Performance of Al_2O_3 -containing TaSi_2 - MoSi_2 -borosilicate Glass Coating on Porous SiCO Ceramic Composites for Thermal Protection[J]. RSC Advances, 2018, 8: 13178-13185.
- [18] XU Lin, LI Xin-chao, NI Li-yong, et al. Ablation Behavior of Functional Gradient Ceramic Coating for Porous Carbon-bonded Carbon Fiber Composites[J]. Corrosion Science, 2018, 142: 145-152.
- [19] TAO X, ZHANG L, MA X, et al. Preparation of a Flexible High Emissivity Coating on Quartz Fiber Fabric for Thermal Protection[J]. Ceramics International, 2017, 43: 14292-14300
- [20] DU B, HONG C, ZHOU S, et al. Multi-composition Coating for Oxidation Protection of Modified Carbon-bonded Carbon Fiber Composites[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2016, 36(14): 3303-3310.
- [21] DU B, HONG C, QU Q, et al. Oxidative Protection of a Carbon-bonded Carbon Fiber Composite with Double-layer Coating of MoSi_2 -SiC Whisker and TaSi_2 - MoSi_2 -SiC Whisker By Slurry Method[J]. Ceramics International, 2017, 43: 9531-9537.