

碳气凝胶抗氧化研究进展

梁磊 迟浩泽 吴文军 孙陈诚 李俊宁

(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 碳气凝胶(CA)由于其低导热率和高达3 000 °C的热稳定性使其有望应用在超高温隔热材料领域,然而其在>400 °C的有氧环境中容易氧化导致性能急剧下降,因此,提高其在有氧环境下的隔热能力是非常必要的。本文针对碳气凝胶高温有氧环境下难以应用的难题,对目前国内外在碳气凝胶抗氧化方面的研究进行了充分的调研,通过基体改性和涂层改性两方面对碳气凝胶抗氧化领域的现有研究、存在的不足以及未来的发展趋势进行了充分的论述,为碳气凝胶抗氧化研究提供了新的思路和见解。

关键词 碳气凝胶, 抗氧化, 基体改性, 涂层改性

中图分类号:TB33

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2025.04.003

Research Progress of Carbon Aerogel Antioxidant

LIANG Lei CHI Haoze WU Wenjun SUN Chencheng LI Junning

(Science and Technology on Advance Functional Composites Laboratory, Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract Carbon aerogel (CA) shows great promise for use in ultra-high-temperature thermal insulation materials due to its low thermal conductivity and thermal stability up to 3 000 °C. However, it is prone to oxidation in oxygen-rich environments above 400 °C, leading to a significant decline in performance. Therefore, improving its thermal insulation capabilities in oxygen-rich environments is essential. This paper addresses the challenge of applying carbon aerogel in high-temperature oxygen-rich environments. It conducts a comprehensive review of current research on carbon aerogel oxidation resistance both domestically and internationally. Through two aspects—matrix modification and coating modification—the paper thoroughly discusses existing research, existing shortcomings, and future trends in the field of carbon aerogel oxidation resistance, providing new insights and perspectives for carbon aerogel oxidation resistance research.

Key words Carbon aerogel, Antioxidant, Matrix modification, Coating modification

0 引言

为了满足人类空间探索和长途运输日益增长的需求,航空航天飞行器的速度也在不断提升,速度提升导致剧烈的空气动力学加热效应会使组件急剧升温,甚至高达1 650 °C,因此对隔热和抗烧蚀的热保护系统的需求也在不断提升^[1-4]。陶瓷隔热瓦、纳米隔热材料和隔热毡难以在如此高的温度下使用,而碳毡、碳泡沫等复合材料虽可以满足超高温下的使用,但其隔热性能不佳。碳气凝胶(CA)具有低密度、低热导率、耐酸碱、高孔隙率及高比表面积、耐超高温(惰性气氛下3 000 °C仍能保持介孔结构)等一系列优异性能,因而成为超高温隔热领域具有潜力的候选材料^[5-6]。当前,碳气凝胶存在高脆性、机械强度不足及样品尺寸难以放大等问

题,制约了其应用拓展。通过引入有机纤维增强体并控制纤维与基体前驱体间的界面收缩匹配,上述关键问题已得到有效解决,成功制备出大尺寸且具有优异力学性能的碳纤维增强碳气凝胶(C/CA)复合材料^[7-9]。同时,CA存在显著缺陷:当处于高温(>400 °C)有氧环境时,其碳骨架易与氧气发生氧化反应并迅速消耗。C/CA的氧化过程将导致材料孔隙率显著降低、结构完整性受损及力学性能劣化。故需提升C/CA的抗氧化性能,方能在高温条件下实现有效应用,以期进一步拓展其在氧化环境中的应用范围。

提升CA的抗氧化性能通常采用两种策略:其一是将抗氧化成分分散于碳气凝胶内部,以增强基体自身的抗氧化能力,称为基体改性;其二是在碳气凝胶表面

收稿日期:2024-09-24

第一作者简介:梁磊,1995年出生,博士,工程师,主要从事高效隔热材料方面的研究工作。E-mail:llhitstu@126.com

构筑抗氧化涂层,从而提升其抗氧化性能,称之为涂层改性。本综述将从基体改性与涂层改性两个维度,系统阐述当前研究进展、现存挑战及未来发展趋势。

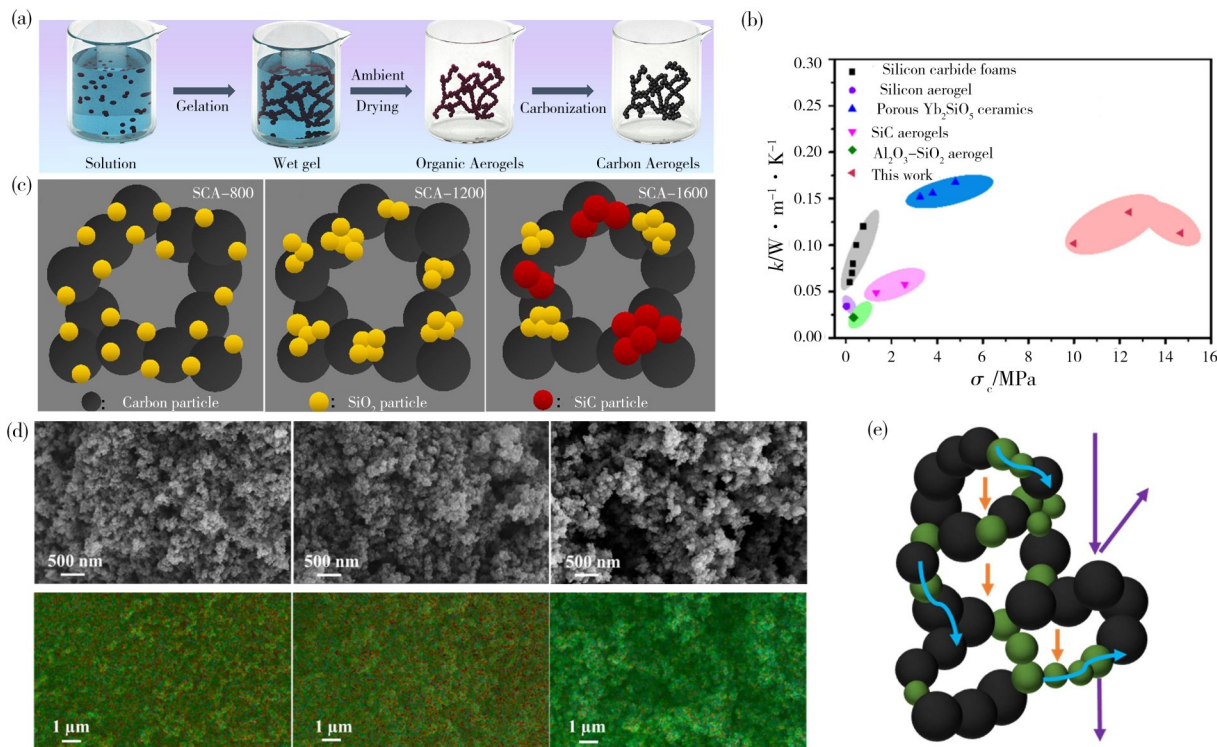
1 基体改性

将抗氧化元素均匀掺入CA基体的相关研究开展以来,迄今已有近十年历史,诸多学者通过将硅、铝、锆、硼等元素引入到碳基体中,以 SiO_2 ^[10-12]、 SiC ^[13-14]、 SiOC ^[15]、 $\text{TiB}_2\text{-B}_4\text{C}$ ^[16]、玻璃/岩棉复合纤维^[17]、 ZrCO ^[18-19]等添加相的形式与CA基体复合,显著改善了CA的抗氧化性能。

在CA的抗氧化研究中,最广泛采用的策略之一是引入硅基前驱体,使其在碳基体中形成 SiO_2 相,从而提升材料的抗氧化性能。在后续热处理过程中,常伴随SiC相的生成,因此通常形成 $\text{SiO}_2/\text{SiC}/\text{C}$ 三元复合气凝胶体系。WU等人^[20]以甲基三甲氧基硅烷为硅源、酚醛树脂为碳源,通过溶胶-凝胶共聚合、常压干燥及碳化工艺,成功制备了二氧化硅改性碳气凝胶(SCAs)[图1(a)]。所得SCAs的密度为中等偏高水平(0.5 g/cm^3),并呈现平均孔径约为33 nm的中孔结构。碳化过程中,随着温度升高,硅氧烷逐渐转化为无定形 SiO_2 颗粒及晶态SiC颗粒[图1(c)],这些颗粒包覆于碳纳米颗粒表面,显著增强了气凝胶的抗氧化性。该SCAs表现出高达10.0 MPa的压缩强度,其室温($25\text{ }^\circ\text{C}$)热导率为 $0.118\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 。得益于 SiO_2 的保护作用,经 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 碳化所得SCAs在空气氛围中的质量残留率达17.89%。随着碳化温度进一步升高,在SiC与 SiO_2 共同保护作用下,SCAs

的质量残留率从17.89%逐渐增至20.47%,其起始分解温度亦由 $690\text{ }^\circ\text{C}$ 提升至 $725\text{ }^\circ\text{C}$ 。对比分析表明,SCAs在热导率与抗压强度方面展现出优于其他隔热材料的综合性能[图1(b)]。DU等人^[21]则采用化学气相沉积(CVD)法制备了碳@二氧化硅(C@SiO_2)核壳结构气凝胶。该气凝胶中 SiO_2 壳层厚度为 $6.81\sim 20.54\text{ nm}$,其覆盖层使核壳结构气凝胶在空气中的起始氧化温度较纯碳气凝胶提高了 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 。

CHENG等^[22]以预反应间苯二酚-甲醛凝胶(R-F)为碳源,四乙氧基硅烷为硅源,经由常压干燥工艺制备了均匀的二氧化硅/酚醛树脂杂化气凝胶,随后经碳热还原获得SiC/C气凝胶。该SiC/C气凝胶的平均孔径为17 nm。扫描电子显微镜(SEM)及能谱(EDS)元素面分布分析表明[图1(d)、(e)],气凝胶骨架由平均粒径约30 nm的SiC颗粒与碳气凝胶颗粒通过纳米尺度互连构成。SiC的引入在维持碳基气凝胶隔热特性的同时,有效提升了其力学强度。采用马弗炉测试了SiC/C气凝胶与纯莫来石毡在 $1400\text{ }^\circ\text{C}$ 空气中的隔热性能。恒温 $1400\text{ }^\circ\text{C}$ 持续35 min后, SiC/C气凝胶背温稳定于 $406\text{ }^\circ\text{C}$,显著低于纯莫来石毡的 $501\text{ }^\circ\text{C}$,彰显其优异的隔热性能及在极端环境中的应用潜力。在工业应用层面实现了SiC/C气凝胶力学强度(0.57 MPa)与热导率 $[0.033\text{ W/(m}\cdot\text{K)}]$ 的良好平衡,并显著增强了其抗氧化性能($600\text{ }^\circ\text{C}$ 空气氛围中氧化2 h后质量损失率为45%)。



注:(a)~(c)为 $\text{SiO}_2/\text{SiC}/\text{C}$; (d)、(e)为SiC/C。

图1 $\text{SiO}_2/\text{SiC}/\text{C}$ 三元气凝胶和SiC/C气凝胶

Fig. 1 $\text{SiO}_2/\text{SiC}/\text{C}$ ternary aerogel and SiC/C aerogel

SiOC 陶瓷兼具优异的抗氧化性与低导热特性。基于此,哈尔滨工业大学张幸红课题组^[23]以甲基三甲氧基硅烷与二甲基二甲氧基硅烷为硅源,通过溶胶-凝胶法、溶剂置换、常压干燥及高温热处理工艺,成功制备了 SiOC/CA[图 2(a)]。该气凝胶呈现 CA 与 SiOC 的双网络复合结构[图 2(b)],并表现出显著的抗氧化性能:

其起始氧化温度为 504 ℃,经 640 ℃氧化后质量损失率仅为 49%;而纯 CA 起始氧化温度为 450 ℃,同等条件下质量损失率达 100%。在酒精喷灯火焰中直接灼烧 3 min 后, SiOC/CA 仍维持完整的宏观结构,仅局部区域呈暗红色[图 2(c)],证实其具备优异的阻燃性能。上述特性表明 SiOC/CA 适用于极端环境应用领域。

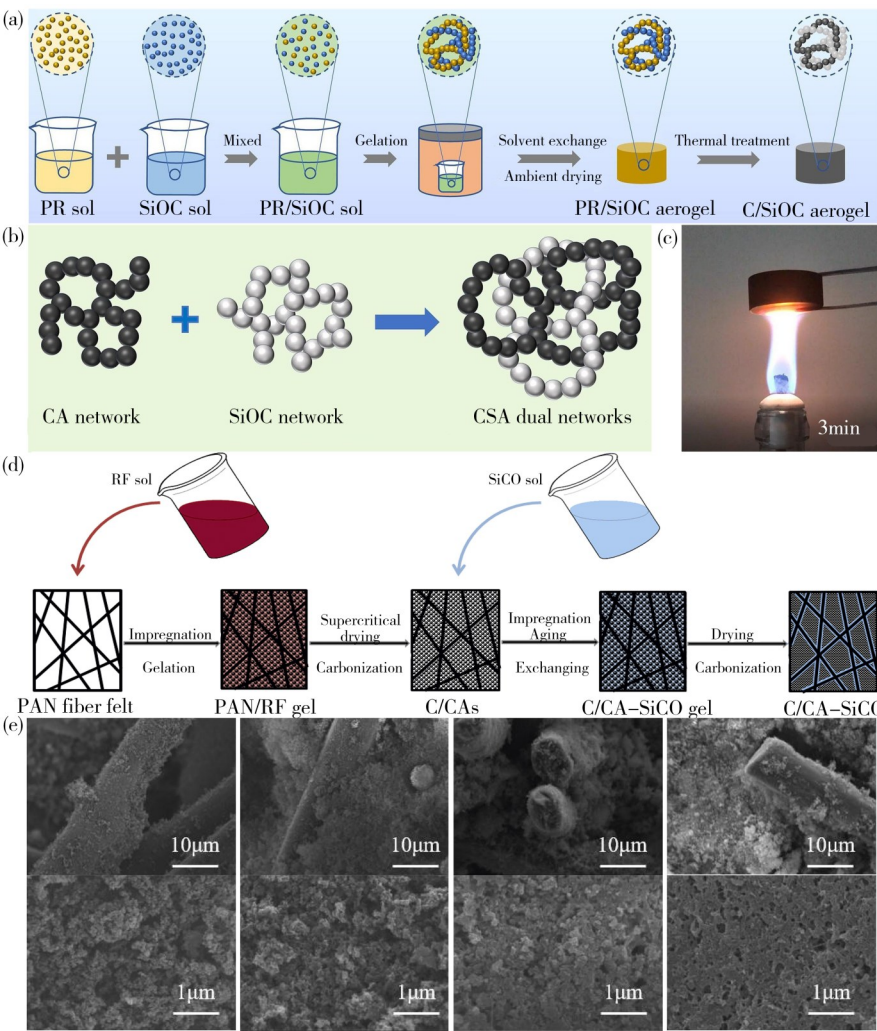


图 2 SiOC 复合碳气凝胶

Fig. 2 SiOC/C aerogel

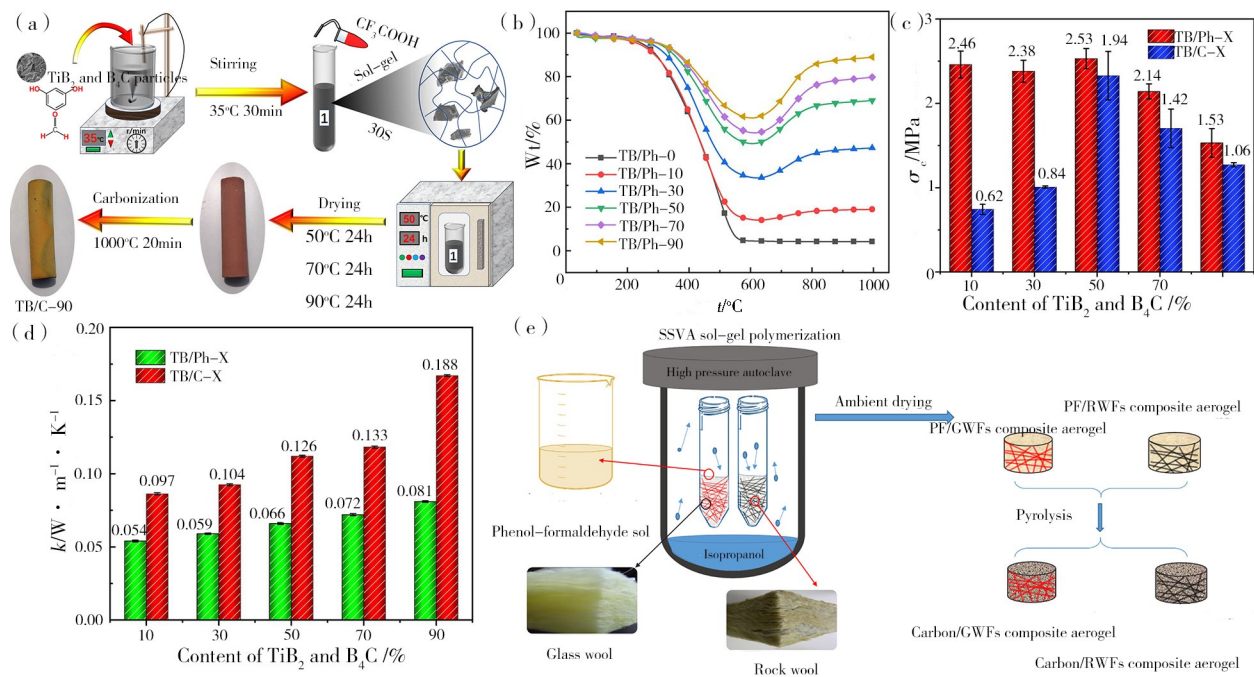
国防科技大学冯坚课题组^[24]以甲基三甲氧基硅烷(MTMS)和二甲基二甲氧基硅烷(DMDMS)为原料合成 SiOC 前驱体,并选用聚丙烯腈基纤维毡作为增强体、间苯二酚-糠醛为基体原料,制备了纤维增强碳气凝胶(C/CA)。随后,采用 SiCO 前驱体溶胶浸渍该纤维增强 CA,经溶剂置换、干燥及碳化处理,成功制备出具有 SiCO 陶瓷涂层的碳气凝胶复合材料(C/CA-SiCO),如图 2(d)所示。通过调控增强纤维的形状与尺寸,可实现复合材料宏观形貌的精确调控,表明 C/CA-SiCO 体系具备规模化制备潜力。CA 基体中的纳米孔隙以及 C/CA 复合材料中的裂纹缺陷,使得 SiCO 前驱体溶胶得以充分渗透并在内部形成涂

层。高倍显微观察[图 2(e)]显示, SiCO 涂层内部呈现为由众多球形纳米颗粒组成的多孔网络状簇集结构,其粒径与孔洞分布相对均匀。SiCO 内涂层的引入显著提升了复合材料的力学性能及抗氧化性能。在 1 600 ℃空气氛围中加热 60 min 后,该材料质量损失率仅为 7.57%,平面内收缩率低于 2%。抗氧化测试后, C/CA-SiCO 表面区域形成丰富的 β -SiO₂ 晶体,而复合材料内部区域仍保持非晶态特征。该复合材料体系有望为先进航空航天飞行器关键部位的热防护提供材料解决方案。

LI 等^[16]采用间苯二酚-甲醛体系(R-F)制备 CA,并通过引入 TiB₂与 B₄C 颗粒作为添加剂提升其抗氧

化性能。为避免重力作用导致的颗粒沉降与分散不均,该课题组选用三氟乙酸(CF_3COOH)作为催化剂以加速R-F体系凝胶化进程,成功将凝胶时间缩短至20~40 s[图3(a)]。在碳化过程中, TiB_2 与 B_4C 颗粒经氧化还原反应逐步转化为 TiO_2 颗粒及玻璃态 B_2O_3 层,致使气凝胶纳米球表面致密化,形成有效的抗氧化屏障。当 TiB_2 与 B_4C 添加量达到90%时,复合材料在1 000 °C空气环境中的残碳率达90.01%,较酚

醛气凝胶提升84.33%[图3(b)]。所制备的 TiB_2 - B_4C /CA具有 $0.331\sim 0.647\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的低密度、 $0.62\sim 1.94\text{ MPa}$ 的较高抗压强度[图3(c)]以及 $0.097\sim 0.188\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的低热导率[图3(d)]。此研究为提升CA复合材料的抗氧化性与力学性能提供了重要技术路径,该材料在高超声速飞行器热防护系统(TPS)及民用工业建筑等领域的热结构应用中具备显著潜力。



注:(a)~(d)为 TiB_2 - B_4C /CA,(e)为GWF-GWF/CA。

图3 TiB_2 - B_4C /CA的制备、残碳率、力学性能和热导率及GWF-GWF/CA的制备

Fig. 3 Preparation, residual carbon content, mechanical properties, and thermal conductivity of TiB_2 - B_4C /CA, and preparation of GWF-GWF/CA

玻璃棉纤维与岩棉纤维因其优异的热学性能、质量轻、高抗拉强度及低成本优势,被广泛用作绝缘材料。基于上述特性,SERAJI等^[17]以玻璃棉纤维和岩棉纤维作为增强相,以苯酚-甲醛(P-F)为前驱体体系制备CA复合材料。通过P-F溶胶浸渍纤维法制备玻璃棉纤维与岩棉纤维增强酚醛复合气凝胶,经常压干燥及 850°C 碳化处理,成功转化为纤维增强CA复合材料[图3(e)]。研究系统考察了纤维种类及质量分数对CA复合材料性能的影响规律。结果表明:岩棉纤维对P-F气凝胶热稳定性的增强效果更为显著。当岩棉纤维质量分数为2.5%时,CA的最大氧化速率温度由 594°C 提升至 643°C 。添加质量分数为2.5%的玻璃棉纤维与岩棉纤维,分别使气凝胶的特征动力学温度提升约38和 44°C 。岩棉纤维对CA抗氧化性能的改善作用优于玻璃棉纤维。鉴于其低成本优势及简化的制备工艺,玻璃棉纤维与岩棉纤维的引入对提升CA热稳定性具有重要应用价值。

2 涂层改性

目前,抗氧化涂层的研究主要集中在碳/碳复合材料、短切碳纤维复合材料(CBCF)等领域。针对CA的涂层改性研究相对较少。航天材料及工艺研究所、中国科学院金属研究所等单位在该领域已开展并取得了一些卓有成效的研究。

航天材料及工艺研究所^[25]采用特定比例的钬(Hf)粉、硅(Si)粉和硼(B)粉,与有机溶剂配制形成前驱体溶液。通过单面浸渍、烘干固化和高温原位反应烧结工艺,成功制备了双层超高温抗氧化涂层,所制备涂层的典型微观形貌如图4(a)所示。依据材料组分及孔隙分布特征,涂层结构自外而内可划分为:表面抗氧化涂层、中间过渡抗氧化层及内部基体层。各涂层之间以及涂层与基体之间的界面结合良好,未观察到明显的分层或开裂现象。

采用高温马弗炉在空气气氛下对材料的高温抗氧化性能进行了测试,测试温度与时间分别为 $1700^\circ\text{C}/600\text{s}$

和 1 750 °C/300s。测得的质量损失率分别为 1.1×10^{-5} 和 $1.5 \times 10^{-5} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。结果表明:高温氧化后氧化层的微观结构基本保持氧化前的形貌特征[图 4(b)],整体结构完整性良好,内部未出现分层或开裂现象。这表明该复合材料在 1 700 ~ 1 750 °C 测试温度区间表现出优异的抗氧化性能。材料表面形成的致密 SiO_2 氧化膜及弥散分布有 HfO_2 的 SiO_2 氧化膜,为其提供了优异的抗氧化保护作用。

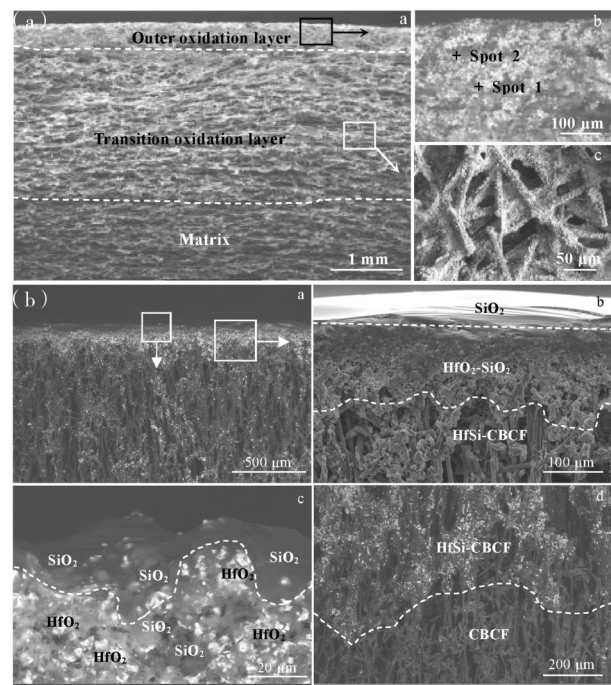


图 4 双层抗氧化涂层

Fig. 4 Double layer antioxidant coating

中国科学院金属研究所成功开发了一种具备梯度结构的碳化硅(SiC)抗氧化涂层^[26]。此研究选用密度为 $0.6 \text{ g}/\text{cm}^3$ 、抗压强度达 80 MPa 的 C/CA 复合材料作为基体^[7]。如图 5(a)所示,将 Al_2O_3 与 SiO_2 粉末在乙醇介质中均匀分散形成混合浆料,经涂覆于 C/CA 整体材料表面并干燥后,构筑多孔阻隔层。随后将试样置于填充硅粉的石墨坩埚中,在氩气保护气氛下经 1 300~1 400 °C 热处理。最终制得具有梯度涂层的复合材料(Compos-G),其涂层微观结构如图 5(b)所示。该陶瓷涂层可划分为三个特征区域:表面区、近过渡区及过渡区。表面区厚度约 40 μm ,主要由 SiC 、 $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ (莫来石)及 Al_2O_3 三相构成。高倍显微图像显示该区域组织致密,无孔隙与裂纹缺陷。近过渡区厚度约 210 μm ,其中 C/CA 复合材料中类气凝胶基体与硅反应生成 SiC 纳米颗粒,致使材料孔径显著减小。过渡区厚度约 150 μm , SiC 团簇自组装形成直径约 500 nm 的球状结构,均匀分布于气凝胶网络骨架中。所制备材料(图 5)在约 1 900 °C 工况条件下表现出卓越的综合性能:烧蚀速率低至 $0.38 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,10 mm 厚度范围内实现 1 050 °C 的温降梯度[热导率 $0.21 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$],热收缩率仅为 0.08%,且在 1 900 °C 高温下仍保持 90.5 MPa 的抗压强度。此研究通过选择性陶瓷化策略构筑的新型碳-陶瓷复合材料,为碳气凝胶抗氧化机制研究提供了重要理论依据,同时为提升纳米多孔碳基材料的抗烧蚀性能开辟了新途径。

基于该课题组前期关于梯度结构 SiC 抗氧化涂

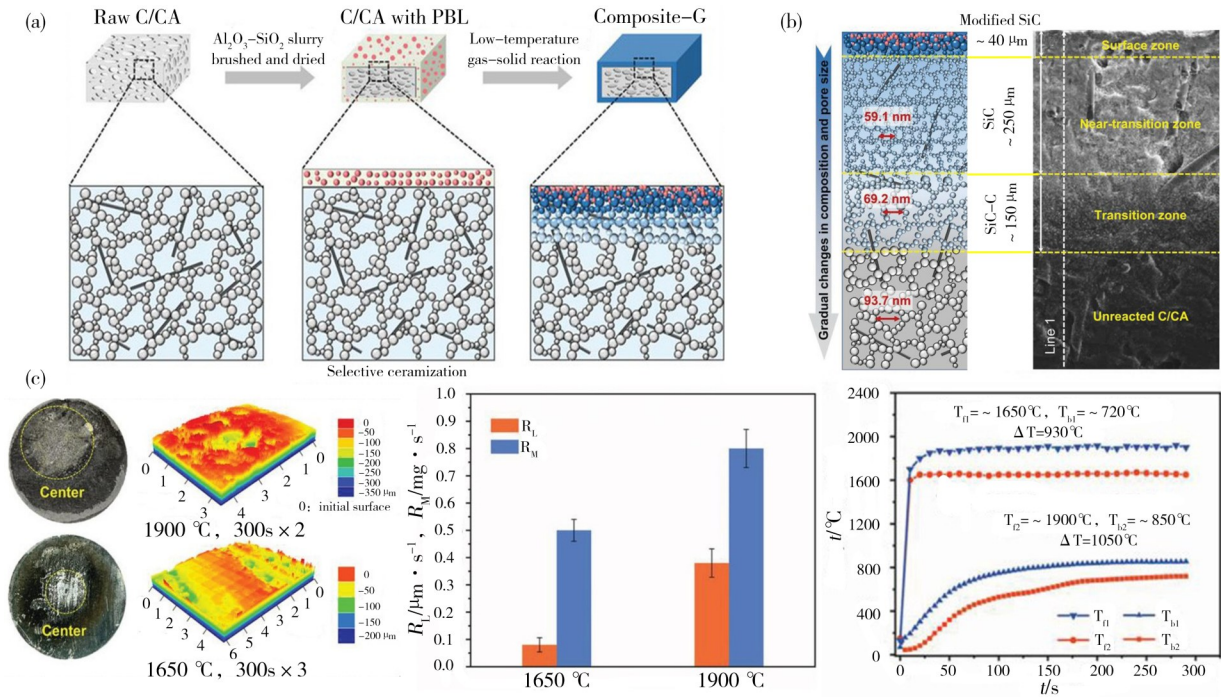


图 5 梯度结构 SiC 抗氧化涂层

Fig. 5 Gradient structure SiC antioxidant coating

层复合材料(Compos-G)的研究,受化学气相沉积(CVD)法制备的SiC涂层所具备的优异力学性能、与碳基材料良好的化学相容性,特别是其氧化生成的SiO₂膜层具有低氧扩散率等特性的启发,本研究采用CVD结合低温气固原位反应工艺,在C/CA复合材料表面成功制备了致密且无裂纹的CVD-SiC涂层^[27]。如图6(a)所示,制备过程为:以甲基三氯硅烷为前驱体,在1100℃条件下,通过CVD工艺在梯度结构SiC抗氧化涂层复合材料(Compos-G)表面热解沉积20h,形成致密SiC涂层。所得具有SiC涂层的C/CA复合材料命名为Compos-GC。该复合材料的涂层结构如图6(b)所示,由三层构成:最外层为CVD-SiC层,中间层为梯度结构SiC层(约400 μm,源自Compos-G中的涂层),内层为原始C/CA基体。最外层的CVD-SiC涂层厚度约为40 μm,结构致密,无裂纹,表面呈现由众多球形凸起组成的形貌。X射线衍射(XRD)分析表明该涂层为面心立方结构的β-SiC相。

该顶部SiC涂层均匀覆盖在具有SiC梯度层的C/CA基体上,未观察到穿透性裂纹或界面分层现象。

双层涂层复合材料(Compos-GC)表现出极高的拉伸结合强度,达6.79 MPa,接近于基材自身的拉伸强度,表明涂层与基材之间呈现强界面结合。如图6(c)所示,Compos-GC展现出良好的耐烧蚀性能:在厚度为10 mm的样品上,于1900℃烧蚀600 s后,其线性烧蚀速率仅为0.62 μm/s,且温度降至930℃。这种将致密CVD层与梯度陶瓷化层相结合的策略,可拓展应用于具有优异高温性能的其他组分(如ZrC、HfC),有望进一步提升C/CA复合材料在超高温环境下的抗烧蚀性能。借助梯度陶瓷层制备CVD涂层的策略,有效实现了无裂纹且低残余应力涂层的制备,从而显著提升了复合材料的力学性能与抗烧蚀性能,为增强C/CA的抗氧化能力并拓展其在极端环境下的应用提供了新途径。

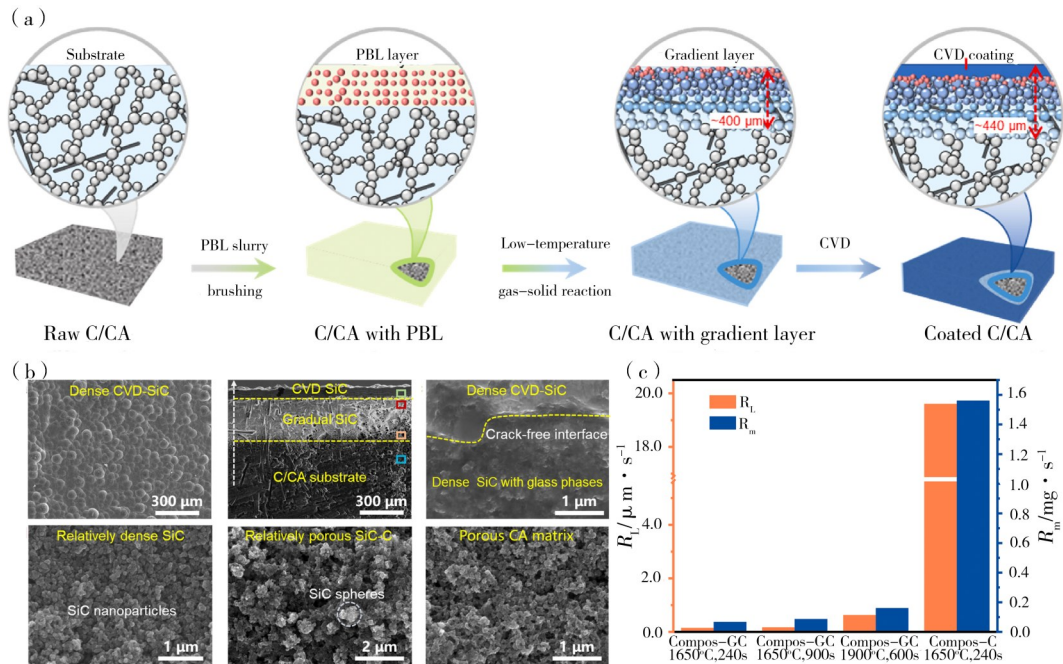


图6 CVD-SiC涂层碳气凝胶
Fig. 6 CVD-SiC coating carbon aerogel

3 结语

关于碳基气凝胶抗氧化性能提升的研究已开展近十年,但目前仍存在以下关键问题:(1)针对CA抗氧化性能的研究相对有限,特别是涂层改性方向尚处于初始探索阶段;(2)抗氧化机制研究尚未深入,相关理论体系亟待完善;(3)基体改性研究所涉及的材料体系丰富度不足,有效抗氧化组元有待进一步拓展;(4)基体改性与涂层改性策略相对独立,协同增效思路有待深化。因此,为提升CA抗氧化性能,亟需加强科研投入力度:拓展材料体系多样性,深化涂层改性机理研究,

完善基础理论框架,并探索基体改性与涂层改性技术的协同应用策略,共同增强其抗氧化能力。

参考文献

- [1] PADTURE N P. Advanced structural ceramics in aerospace propulsion[J]. Nat. Mater., 2016, 15(08): 804-809.
- [2] GUO P, LI J, PANG S, et al. Ultralight carbon fiber felt reinforced monolithic carbon aerogel composites with excellent thermal insulation performance [J]. Carbon, 2021, 183: 525-529.
- [3] HU L, HE R, LEI H, et al. Carbon aerogel for insulation applications: A review [J]. International Journal of Thermophysics, 2019, 40(04): 39.

- [4] 郭鹏磊. 新型纤维增强碳气凝胶复合材料的制备与性能研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023.
- GUO P L. Preparation and Properties of New Fiber Reinforced Carbon Aerogel Composites [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2023
- [5] MEN J, FENG J, JIANG Y, et al. Synthesis of environmentally friendly nanoporous monolithic carbon aerogels via ambient pressure drying for high-temperature thermal insulators [J]. ACS Applied Nano Materials, 2024, 7(07): 7132-7141.
- [6] ZHANG Y, GONG L, XU X, et al. Synthesis of carbon aerogels with controlled morphology and pore structure to modulate their bulk density and thermal conductivity via a quick one-pot preparation strategy [J]. Carbon, 2024, 216: 118487.
- [7] LI J, GUO P, HU C, et al. Fabrication of large aerogel-like carbon/carbon composites with excellent load-bearing capacity and thermal-insulating performance at 1800 °C[J]. ACS Nano, 2022, 16(04): 6565-6577.
- [8] MA J, LI J, GUO P, et al. Tailoring microstructures of carbon fiber reinforced carbon aerogel-like matrix composites by carbonization to modulate their mechanical properties and thermal conductivities [J]. Carbon, 2022, 196: 807-818.
- [9] LI L, LIU F, FENG J, et al. Effects of carbonization temperature on mechanical and thermal insulation properties of carbon aerogel composites using phenolic fibers as reinforcement [J]. Journal of Nanomaterials, 2023: 1113343.
- [10] GHAFORIAN N S, BAHRAMIAN A R, SERAJI M M. Investigation of the effect of rice husk derived Si/SiC on the morphology and thermal stability of carbon composite aerogels[J]. Materials & Design, 2015, 86: 279-288.
- [11] YU Z L, YANG N, V APOSTOLOPOULOU-KALKAVOURA, et al. Fire-retardant and thermally insulating phenolic-silica aerogels[J]. Angew. Chem. Int. Ed., 2018, 57: 4538 - 4542
- [12] S AZADEH, A R BAHRAMIAN, A SHARIF, et al. Thermal oxidation process of in-situ silicon carbide incorporated carbon aerogel, experimental and kinetic study [J]. Corrosion Science, 2018, 142: 175 - 184.
- [13] WU X, SHAO G, SHEN X, et al. Evolution of the novel C/SiO₂/SiC ternary aerogel with high specific surface area and improved oxidation resistance[J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 330: 1022-1034.
- [14] SERAJI M M, GHAFORIAN N S, BAHRAMIAN A R, et al. Preparation and characterization of C/SiO₂/SiC aerogels based on novolac/silica hybrid hyperporous materials[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2015, 425: 146-152.
- [15] 冯军宗, 姜勇刚, 冯坚. 裂解 SiOC 陶瓷内涂层改善炭气凝胶复合材料抗氧化性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2016(S1): 274-277.
- FENG J Z, JIANG Y G, FENG J. Study on improving oxidation resistance of carbon aerogel composites by cracking SiOC ceramic inner coating [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016(S1): 274-277.
- [16] LI P, SHI M, DENG Z, et al. Achieving excellent oxidation resistance and mechanical properties of TiB₂ - B₄C/carbon aerogel composites by quick-gelation and mechanical mixing [J]. Nanotechnology Reviews, 2022, 11(01): 3031-3041.
- [17] SERAJI M M, KIANERSI A, HOSSEINI S H, et al. Performance evaluation of glass and rock wool fibers to improve thermal stability and mechanical strength of monolithic phenol-formaldehyde based carbon aerogels[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2018, 491: 89-97.
- [18] CUI S, SUO H, JING F, et al. Facile preparation of ZrCO composite aerogel with high specific surface area and low thermal conductivity[J]. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 2018(86): 383 - 390.
- [19] YE L, QIU W, LI H, et al. Preparation and characterization of ZrCO/C composite aerogels[J]. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 2013, 65: 150 - 159.
- [20] WU K, ZHOU Q, CAO J, et al. Ultrahigh-strength carbon aerogels for high temperature thermal insulation [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2022, 609: 667-675.
- [21] WANG H Q, ZHANG C, ZHOU B, et al. Ultra-black carbon@silica core-shell aerogels with controllable electrical conductivities[J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2019(02): 743 - 752.
- [22] CHENG Y, ZHANG J, REN C, et al. Facile preparation of high-strength SiC/C aerogels from pre-reacted resorcinol - formaldehyde and siloxane[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2024, 134: 75-83.
- [23] YANG D, DONG S, XIN J, et al. Robust and thermostable C/SiOC composite aerogel for efficient microwave absorption, thermal insulation and flame retardancy [J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 469: 143851.
- [24] LI X, FENG J, JIANG Y, et al. Anti-oxidation performance of carbon aerogel composites with SiCO ceramic inner coating[J]. Ceram. Int., 2019, 45(08): 9704-9711.
- [25] 徐林, 王树浩, 蔡东旭, 等. 低密度碳纤维复合材料耐高温抗氧化技术研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(11): 3672-3679.
- XU L, WANG S H, CAI D X, et al. Research on high temperature and anti-oxidation technology of low density carbon fiber composite materials [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(11): 3672-3679.
- [26] YAN M, HU C, LI J, et al. An unusual carbon-ceramic composite with gradients in composition and porosity delivering outstanding thermal protection performance up to 1900 °C [J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(36): 2204133.
- [27] YAN M, HU C, LI J, et al. Construction of a ceramic coating with low residual stress on C/CA composites for thermal protection at ultra-high temperatures [J]. Composites Part B: Engineering, 2023, 266: 110970