

C/SiC 喷管及其超高温抗氧化涂层 烧蚀行为模拟研究

白瑀¹, 汤富领¹, 杨彦龙¹, 薛红涛¹, 曹生珠², 张凯峰²

(1.兰州理工大学 有色金属先进加工及再利用国家重点实验室, 兰州 730050;

2.真空技术与物理国家重点实验室, 兰州 730000)

摘要: **目的** 提高 C/SiC 材料发动机喷管的高温抗烧蚀性能。**方法** 基于质量、能量守恒和物性方程建立发动机喷管内燃气湍流模型, 应用数值模拟方法计算喷管基体和各涂层的线烧蚀速率, 并验证模型的准确性。通过比较不同种类涂层的抗烧蚀性能及涂层间匹配性, 建立多元复合涂层体系, 分析体系烧蚀行为及烧蚀机理, 对 $\text{HfO}_2\text{-ZrC-SiC-C/SiC}$ 四元体系在不同温度下的线烧蚀速率进行计算。**结果** Hf 系、Zr 系涂层抗氧化烧蚀性能优异, 最大线烧蚀速率皆处于 $0.3\sim 1.2\ \mu\text{m/s}$ 之间。 HfO_2 具有良好的抗烧蚀性能和自身稳定性。相较其他体系, $\text{HfO}_2\text{-ZrC-SiC-C/SiC}$ 体系喷管的喉部及扩散段线烧蚀率更低。体系在 7 MPa 下, 分别在 1700、2100、2500、2900 K 计算了线烧蚀速率, 最大线烧蚀速率区域产生了迁移现象, 各温度梯度线烧蚀速率分别提高了 174%、20.22%、18.04%。**结论** HfO_2 能够有效地降低喷管收敛段的烧蚀速率, 且适合作为复合涂层体系最外层。温度升高明显加剧了化学反应烧蚀和机械剥蚀, 高温下机械剥蚀是烧蚀的主要因素。

关键词: 超高温陶瓷涂层; 烧蚀; C/SiC 复合材料; 发动机喷管; 化学反应; 数值模拟

中图分类号: TG174.4; TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)11-0305-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.11.034

Ablation Simulation on C/SiC Nozzle and Ultra-high Temperature Ceramic Surface Coatings

BAI Yu¹, TANG Fu-ling¹, YANG Yan-long¹, XUE Hong-tao¹, CAO Sheng-zhu², ZHANG Kai-feng²

(1.State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2.State Key Laboratory of Vacuum Technology and Physics, Lanzhou 730000, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the ablation resistance of C/SiC engine nozzle. The turbulence model of engine nozzle was established based on mass, energy conservation and physical property equation. The linear ablation rate of nozzle substrate and each coating was calculated by numerical simulation method, and the accuracy of the model was verified. Multi-component composite coating system was established by comparing the ablation resistance of different types of coatings and the coating

收稿日期: 2019-01-09; 修订日期: 2019-04-25

Received: 2019-01-09; Revised: 2019-04-25

基金项目: 国家自然科学基金 (11764027); 真空技术与物理国家级重点实验室开放基金 (ZWK1706)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (11764027) and National Key Laboratory of Science and Technology on Vacuum Technology and Physics (ZWK1706)

作者简介: 白瑀 (1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为计算材料学。

Biography: BAI Yu (1993—), Male, Master, Research focus: computational materials science.

通讯作者: 汤富领 (1973—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为计算材料学、功能材料设计。邮箱: tfl@lut.cn

Corresponding author: TANG Fu-ling (1973—), Male, Doctor, Professor, Research focus: computational materials science, functional materials design. E-mail: tfl@lut.cn

matching. The ablation behavior and ablation mechanism of the system were analyzed to calculate the linear ablation rate of $\text{HfO}_2\text{-ZrC-SiC-C/SiC}$ Quaternary system at different temperature. The oxidation ablation performance of Hf and Zr coatings was excellent, and the maximum linear ablation rate was between $0.3\sim 1.2\ \mu\text{m/s}$. HfO_2 had good ablation performance and stability. The ablation rate at the throat and diffusion section of $\text{HfO}_2\text{-ZrC-SiC-C/SiC}$ system was lower compared with other systems. At 7MPa, the linear ablation rate was calculated at 1700 K, 2100 K, 2500 K and 2900 K, and the maximum linear ablation rate region was migrated. The ablation rate of each temperature gradient respectively increased by 174%, 20.22%, 18.04%. HfO_2 can effectively reduce the ablation rate of the convergent section of the nozzle and is appropriate for being used as the outermost layer in the composite system. In addition, the increase of temperature significantly aggravates the ablation of chemical reaction and mechanical denudation, and mechanical denudation becomes the main ablation mechanism at high temperatures.

KEY WORDS: ultra-high temperature ceramics (UHTC) coatings; ablation; C/SiC composites; engine nozzle; chemical reaction; numerical simulation

连续碳纤维增韧碳化硅陶瓷基复合材料(C/SiC)以其低密度、高比模量、高比强度、抗烧蚀、抗热震、低热膨胀系数等优异性能,被广泛用于航天器的热防护构件和火箭发动机喷管等领域^[1-3]。然而 C/SiC 复合材料对于火箭发动机喷管内部高温、高压、高流速且伴有机载载荷的极端恶劣的工作环境十分敏感,不能在 $1650\ ^\circ\text{C}$ 以上长时间使用^[4-5]。因此,进一步提高 C/SiC 材料的抗氧化烧蚀性能是十分必要的。

超高温陶瓷(UHTC)涂层因具有高强度、高硬度、高熔点等特性^[6-7],是提高发动机喷管抗烧蚀性能的有效手段之一。有学者为研究小型固体火箭发动机中 3D C/SiC 复合材料喷管的烧蚀规律^[8],使用固体火箭测试台测量 $100\ \mu\text{m}$ SiC 涂层的 C/SiC 喷管沿长度方向各处的线烧蚀率,发现烧蚀在喉部及其上下游附近最强,收敛段其次,扩散段最弱。这说明了喷管烧蚀因本身结构变化和涂层材料的成分、结构不同而存在的自身烧蚀规律。也有研究者^[9]在 C/SiC 基体上制备了 ZrC-SiC 复合涂层,用氧乙炔法测得涂覆 ZrC-SiC 复合涂层的试样线烧蚀速率为 $0.0252\ \text{mm/s}$,相较未涂覆复合涂层试样,烧蚀降低了 59.5%,复合涂层显著提高了抗烧蚀性能。对其内部烧蚀行为进行研究发现,部分陶瓷层熔融对抗烧蚀有积极作用,ZrC 烧蚀产生的 ZrO_2 在玻璃相 SiO_2 的粘结作用下,与 SiC 层有很好的粘合。这一现象说明了 ZrC-SiC 复合涂层间良好的匹配性。低温下熔融玻璃相 SiO_2 、高温时 HfC 的几种氧化物(如多孔 HfO_2 、 HfC_xO_y 、熔融 HfO_2)都能对基体起到良好的保护作用^[10],呈现出更加优异的抗烧蚀能力。现有的单层、双层超高温抗氧化涂层无法长时间耐受超过 $1800\ ^\circ\text{C}$ 的使役环境,多层复合涂层则能够很好地提高抗氧化能力,解决涂层与基体匹配性等问题。

多元复合涂层体系因其制备的困难度和体系的复杂性,在烧蚀机理方面的研究尚还欠缺,而且对于喷管整体烧蚀情况的研究也较为匮乏,进一步的研究可填补这方面的不足,并为选择合适的涂层提供帮助。火箭发动机喷管的烧蚀过程涉及到传热、流场与

烧蚀的耦合,受扩散、化学反应、机械剥蚀、气相组分和涂层的抗氧化性能等多方面影响^[11-12]。涂层测试方法主要有氧乙炔烧蚀、等离子体烧蚀、搭建烧蚀环境试验台等,多数方法难以真实表达喷管整体的工作环境,而真实火箭喷管环境的试车成本过高。因此,充分考虑各影响因素,发挥各层涂层性能,节省资金、时间成本,数值模拟方法有其优点。目前,基于有限元方法的研究未能将多元复合涂层体系和喷管基体的烧蚀机理联系到一起。为获得喷管整体结构的烧蚀规律以及明确多元复合涂层对抗烧蚀能力的改善作用机制,本文采用有限元分析软件 Comsol Mutiphysics 建立喷管多元复合涂层体系的烧蚀模型,建立 $\text{HfO}_2\text{-ZrC-SiC-C/SiC}$ 体系并与单一涂层、二元复合涂层体系横向对比,研究体系烧蚀性能、烧蚀机理及温度对烧蚀的影响。

1 烧蚀模型建立

当高温、高速燃气流通过火箭发动机喷管喷射而出时,燃气流会对喷管造成复杂的物理化学烧蚀现象。这一过程包括壁面材料与气相组分的热化学反应、材料热解、涂层的抗烧蚀性能、反应物的作用、推进剂颗粒造成机械剥蚀从而引起的质量损失等多方面作用。按照宏观表现,可分为壁面材料氧化分解造成的热化学反应烧蚀和气动剪应力对喷管壁面的机械剥蚀。对于前者而言,推进剂中的 H_2O 被证明是对喷管侵蚀程度最大的氧化气氛,其次是 OH 和 CO_2 ^[13]。这是由于温度升高使氧化组分与各涂层材料发生化学反应,从而造成了喷管的热化学烧蚀。

1.1 基本假设

由于烧蚀过程中牵涉影响因素众多,需对模拟过程进行必要简化,假设如下:

1) 材料各项同性,计算过程不考虑材料孔隙率、裂纹密度的影响。

2) SiC 优良的抗烧蚀性能得益于氧化产物 SiO_2

的存在。然而 1650 K 以上 SiO_2 逐渐处于熔融态, 易被高温高速的气流冲刷流失。因此计算高温烧蚀过程中忽略 SiO_2 的保护作用。

3) 燃气流自身没有颗粒相, 按照纯气相冲蚀计算。

4) 化学反应皆为一级反应, 燃气流主要组分如图 1 所示。可能发生的典型反应方程有^[14-16]:

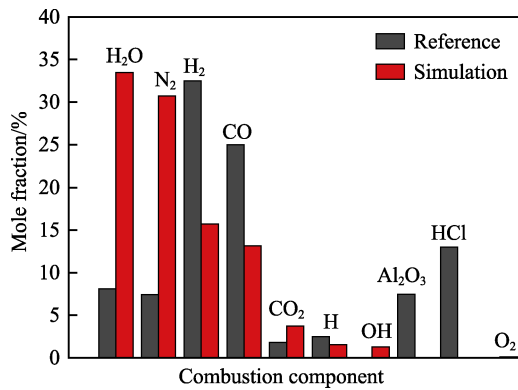
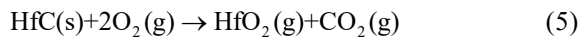
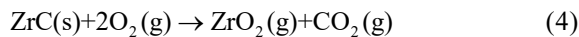
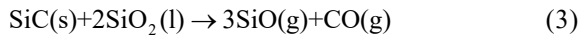
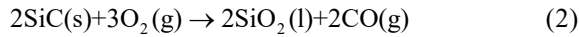


图 1 高温燃气流组成成分对比

Fig.1 Comparison of composition in high temperature gas flow

1.2 边界条件及控制方程

喷管的气动热化学烧蚀, 一方面受化学反应速率的控制, 称为化学动力学控制; 另一方面受燃气组分通过附面层向壁面扩散速率的控制, 称为扩散控制^[17]。

对于复杂体系, 需建立合适的质量守恒方程, 根据湍流附面层理论, 烧蚀壁面的质量守恒方程为:

$$\dot{m}_{w-i} = dD \left(\frac{\partial K_{iw}}{\partial y} \right)_w + \dot{m}_{ic} - dD \left(\frac{\partial K_{ic}}{\partial y} \right)_w \quad (6)$$

式中: $dD \left(\frac{\partial K_{iw}}{\partial y} \right)_w$ 是指氧化性组分扩散质量流率

(其中 D 为扩散系数; K_i 为气相组分 i 的浓度; 下标 w 表示壁面; e 表示附面层; y 是壁面法向); \dot{m}_{ic} 为化学反应质量消耗速率; $dD \left(\frac{\partial K_{ic}}{\partial y} \right)_w$ 是指附面层向壁面的扩散质量流率。

基于热化学反应方程的反应物, 化学动力控制的燃气流组分反应线烧蚀速率为^[18]:

$$\dot{r}_{m-\text{chem}} = \frac{\dot{m}_{m-\text{chem}}}{\rho_m} = \frac{1}{\rho_m} \sum \left(\frac{M_m}{M_i} w_i \right) \quad (7)$$

式中: $\dot{m}_{m-\text{chem}}$ 为质量消耗速率; ρ_m 是材料密度; M_m 是平均相对分子质量。质量消耗率 w_i 由 Arrhenius 定律确定, 为:

$$k_i^f = A^f \left(\frac{T}{T_{\text{ref}}} \right)^{n^f} \exp \left(\frac{-E^f}{R_g T} \right), \quad T_{\text{ref}} = 1000 \text{ K} \quad (8)$$

$$w_i = k_i^f P_{iw}^n \quad (9)$$

式中: k 为化学反应速率常数; 上标 f 代表反应方向; n 是反应温度指数; E 为反应活化能; R_g 是气体常数; T_{ref} 是参考温度, 引入温度修正项使数据更加贴近事实; P 是由道尔顿分压定律确定的 i 组分分压。扩散机制下的线烧蚀速率为^[18]:

$$\dot{r}_{m-\text{diff}} = \frac{\dot{m}_{m-\text{diff}}}{\rho_m} = \frac{1}{\rho_m} \sum \left(\frac{h_c}{C_p} \frac{a M_m}{M_i} K_{ic} \right) \quad (10)$$

式中: h_c 、 C_p 、 a 分别为对流换热系数、恒压热容、反应方程系数。则热化学反应烧蚀速率为:

$$\dot{r}_{ic} = \min(\dot{r}_{m-\text{chem}}, \dot{r}_{m-\text{diff}}) \quad (11)$$

由于本研究体系燃气流没有 Al_2O_3 等粒子的侵蚀作用, 气相对壁面的机械剥蚀作用主要为气动剪应力的对材料的破坏。采用文献^[18]中的半经验公式:

$$\dot{r}_{\text{mech}} = k \cdot v_g^2 \cdot \left(\frac{\rho_g}{\rho_m} \right)^{2.4} \left(\frac{T_w}{T_0} \right) \quad (12)$$

$$v_g = \sqrt{\tau / \rho} \quad (13)$$

式中: k 为修正系数; T_0 为剪切强度临界温度; v_g 为壁面特征冲击速度, 由壁面剪切应力 τ 计算得到。总线烧蚀速率为:

$$\dot{r}_t = \dot{r}_{ic} + \dot{r}_{\text{mech}} \quad (14)$$

基于上述控制方程, 采用 Comsol Mutiphysics 软件建立了 C/SiC 喷管二维有限元模型。建模时首先使用插值曲线建立喷管边界, 然后镜像变换并构成实体, 得到最终几何如图 2 所示。模型材料属性随温度变化而变化, 基于 Comsol Mutiphysics 自身材料库设定。边界条件设定域 1 为高马赫数的高温燃气流, 湍流模型为 Spalart-Allmaras, 域 2、3 设为固体传热接口, 域 4、5 分别为入口边界和出口边界。

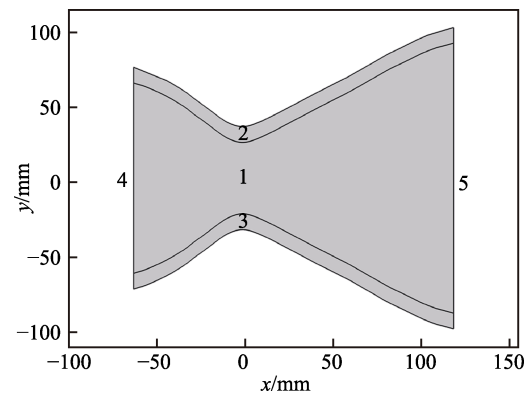


图 2 二维几何模型 (单位: mm)

Fig.2 Two-dimensional geometric model (Unit: mm)

模型内部传热控制方程为:

$$d_z \rho C_p u \nabla q = d_z Q + q_0 \quad (15)$$

$$\mathbf{q} = -d_z k \nabla T \quad (16)$$

$$q_0 = h(T_{\text{ext}} - T) \quad (17)$$

式中： d_z 为法向域厚度； \mathbf{u} 为流体速度矢量； Q 为压力功； k 为导热系数； q_0 为热通量； h 为材料传热系数； T_{ext} 为外部温度。域2、3与外部接触界面设为绝热。式(15)表达了体系的能量守恒。通过上述控制方程将传热、压力耦合到湍流模型中，综合考虑各因素对烧蚀性能的影响。

2 结果及分析

2.1 模型验证

设定边界4的工况为入口燃气总温，为2500 K，

总压为7 MPa，在燃气组分一致的条件下，喷管壁面温度、压力及中轴线马赫数和密度对比如图3所示。高温燃气流经历了一个收敛段与喉部压缩，然后在扩散段膨胀加速的一个过程。可以看出，模拟得到的数据和文献[18]符合良好，均在误差允许范围之内。在此基础上，经过计算得到沿喷管轴线方向的线烧蚀率，并与文献[18]的总线烧蚀速率进行对比，如图4所示。总体而言，从喷管收敛段到喉部，再到喷管扩散段，C/SiC复合材料的线烧蚀率先增后减，最大烧蚀率位于喉部及喉部，靠近收敛段、扩散段附近的区域，约为0.24 mm/s。扩散段尾部的线烧蚀率较文献结果下降速度更快。可以发现，全管线烧蚀速率的实验测量结果^[19]和计算结果^[20]与图4结果拥有一致的规律性。

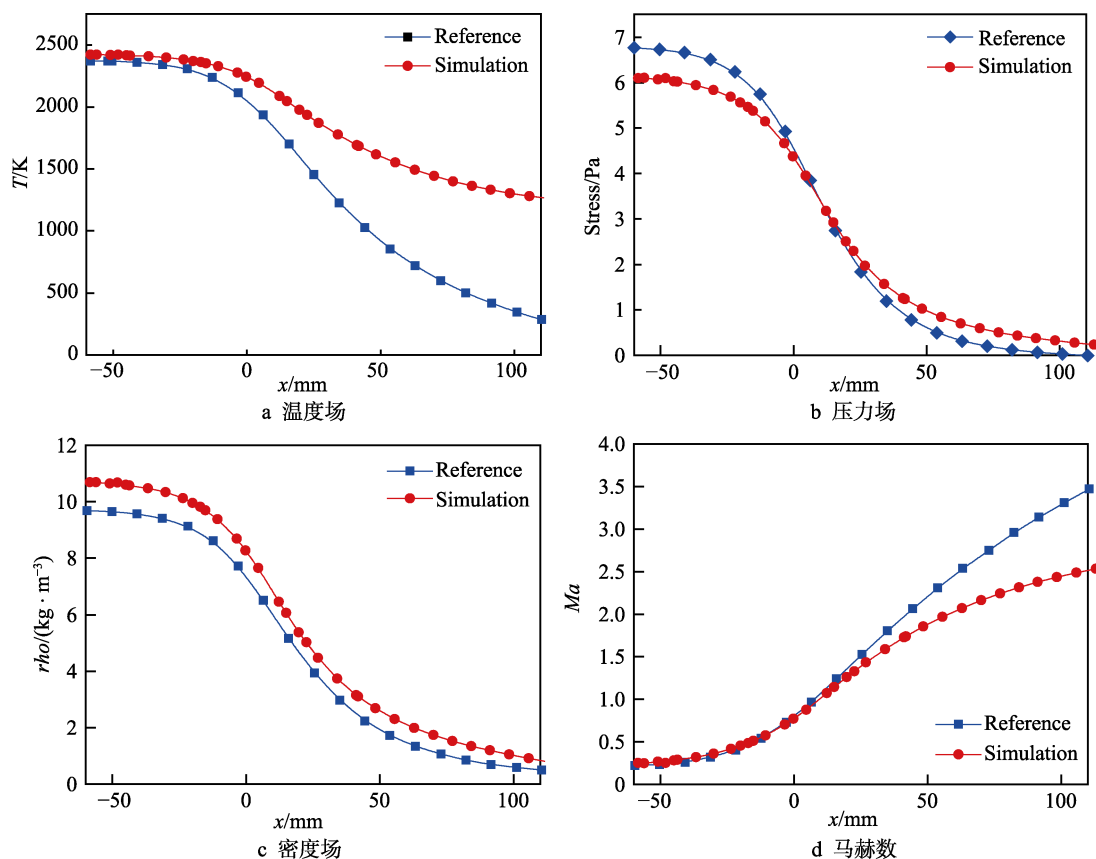


图3 各物理场计算结果与文献[18]对比

Fig.3 Comparison of calculation results of physical fields and reference [18]:
a) temperature field; b) stress field; c) density field; d) Mach

按图5灰色实线建立喷管二维模型，设置与文献[8]相同工况条件，燃气组分如图1中所示，计算工作6 s的烧蚀速率，并与文献进行对比，结果如图5所示。得到的三种计算结果中，Simulation1是C/SiC基体的线烧蚀速率。Simulation2是在C/SiC基体涂覆100 μm SiC涂层后得到的计算结果，但文献的工况3400 K超过了SiC的熔点(3100 K)，而处于熔融态的SiC会被高速气流冲刷带走，SiC不能为基体提供很好的抗烧蚀保护作用。由此通过温度控制，使超过

临界温度的涂层无效，从而计算得到Simulation3。相比试验结果，发现计算得到的线烧蚀率在喷管收敛段较高，在喉部及喉部附近区域均处于误差范围内。

2.2 烧蚀计算

计算出的沿喷管轴线方向各涂层材料在2500 K下的线烧蚀速率如图6所示。明显可以看出，各曲线在横坐标0处，也就是喉部区域，会有一个波峰，这一波峰体现了喷管烧蚀最严重的区域。还可以观察到

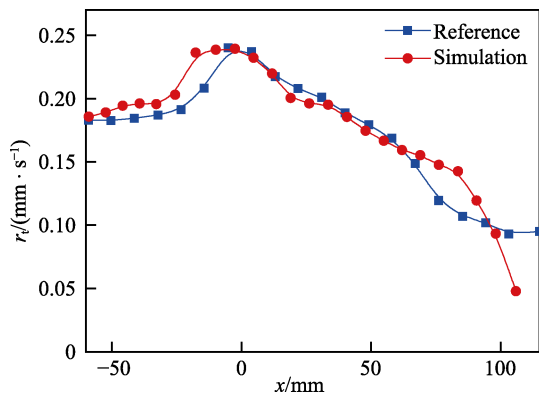


图 4 C/SiC 喷管基体线烧蚀速率

Fig.4 Linear ablation rate of C/SiC nozzle matrix

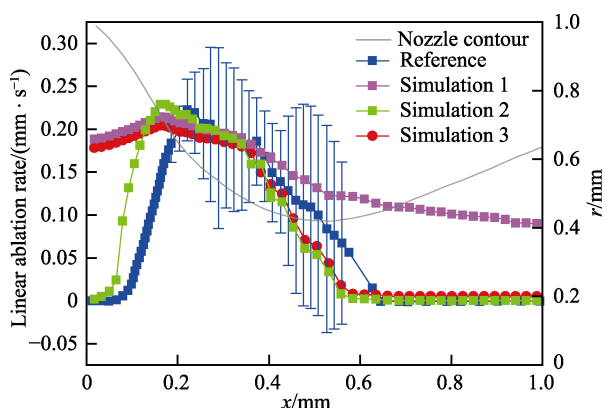
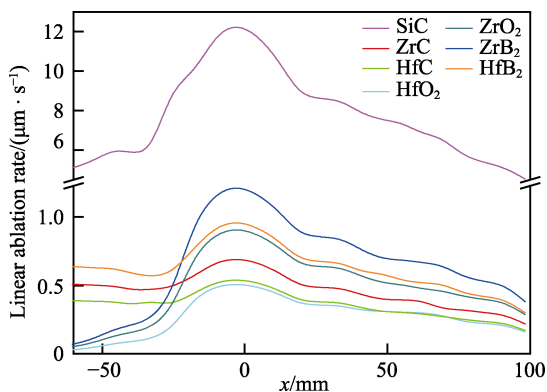
图 5 涂覆 100 μm SiC 层的 C/SiC 喷管线烧蚀速率对比Fig.5 Comparison of linear ablation rate of 100 μm SiC coating on C/SiC nozzle

图 6 2500 K 下各涂层线烧蚀速率

Fig.6 Linear ablation rate of various coatings at 2500 K

烧蚀过程中, SiC 材料的烧蚀量级要明显高于其他 Hf 系、Zr 系涂层材料,这是由于氧化产物玻璃相 SiO_2 在此温度不能带来良好的抗烧蚀性能。ZrO₂、ZrB₂ 在收敛段拥有较低的烧蚀率,与收敛段相比,喉部线烧蚀速率的跨度较大。若喷管涂覆均匀厚度涂层,容易造成喷管在喉部区域的烧穿现象。由式(6)、(7)可知, HfC、ZrC 本身的化学反应造成收敛段烧蚀率增高,而 HfO₂ 自身不会与氧化性组分相反应,涂层的烧蚀机制主要为机械剥蚀,所以 HfO₂ 比 HfC 和 ZrC 更适合作为复合涂层体系的最外层封填层,用来封闭

氧化性组分的扩散通道。

建立合适的复合涂层体系,利用不同涂层间的相互协调能更好地达到共同抗氧化目的。由图 6 中得到的结果中, ZrC 材料烧蚀率较低,但是由于其热膨胀系数 ($6.9 \times 10^{-6} \sim 7.7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) [21] 远超过基体 C/SiC 材料,在体系由室温向超高温这一转变过程中,会不可避免地产生裂纹与脱粘现象[9],引入 SiC 过渡层可以很好地让复合涂层体系拥有较高抗烧蚀性能和较低的热应力。由式(4)、(6)可知, ZrC 层与水蒸气和氧气的可反应性降低了涂层的抗烧蚀能力。因此加入 HfO₂ 作为最外层,其高致密性和稳定性能够弥补 ZrC 层中出现的微孔和微裂纹之不足,从而更好地帮助 ZrC 涂层隔绝水蒸气和氧气的侵蚀。同时,自身的热膨胀系数 ($8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) 和 ZrC 不会产生热膨胀系数过度差异,降低了裂纹和脱粘现象出现的可能性。

如图 7 所示,在保持涂层总厚度仅为 1 μm 的情况下,分别涂覆 1 μm SiC 涂层、0.5 μm ZrC-0.5 μm SiC 复合涂层和 0.5 μm HfO₂-0.35 μm ZrC-0.15 μm SiC 复合涂层,形成三类复合涂层。在 2500 K 下分别烧蚀 10 s 进行计算,并比较。三层复合涂层体系较前两者在喉部区域及扩散段线烧蚀率降低了约 10.5%,且 HfO₂ 在喷管收敛段极大地降低了喷管的线烧蚀率。这是因为喷管收敛段的温度较高,主要烧蚀机制为化学反应烧蚀, HfO₂ 由于自身稳定性可以作为阻挡水蒸气和氧气的屏障,有效地降低了喷管收敛段化学反应烧蚀速率。因此可以推断建立的三层复合涂层体系对于提高烧蚀性能具有较大的积极作用。

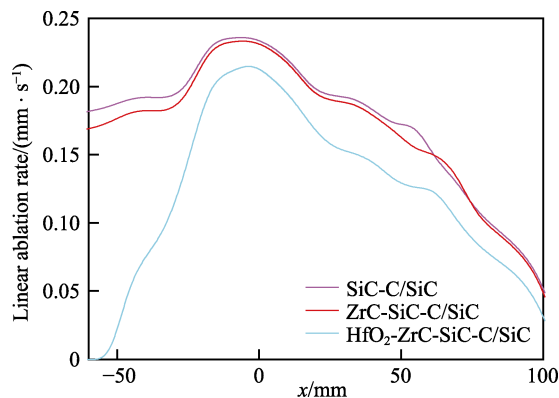


图 7 2500 K 下各复合涂层体系线烧蚀速率

Fig.7 Linear ablation rate of various coating systems at 2500 K

对图 7 建立的 HfO₂-ZrC-SiC-C/SiC 复合涂层体系在不同温度下的烧蚀速率进行计算,其结果如图 8 所示。温度升高明显加剧了喷管整体的烧蚀程度,2100 K 时的最大烧蚀速率约为 1700 K 的 2.74 倍,温度在 2500、2900 K 最大烧蚀速率相比上一温度梯度分别提高 20.22%、18.04%。各曲线在 x 轴上的截距则表明了温度升高会提高收敛段的热化学反应烧蚀速率。1700 K 时,喷管烧蚀量最大的区域位于喉部及靠近喉部的区域;而温度提高到 2900 K 后,烧蚀量最大

区域迁移到喷管喉部区域。这一迁移现象表明温度提升会提高热化学反应速率,机械剥蚀也会随之提高,并在喷管烧蚀中成为主要作用机制。证明了高温、高压状态下,机械破坏决定了涂层和基体的烧蚀速率大小^[22-23]。

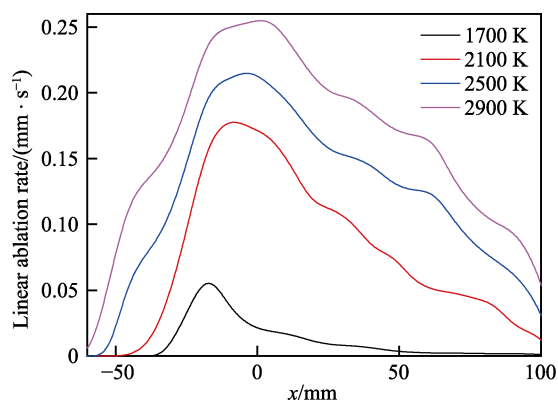


图 8 不同温度下 $\text{HfO}_2\text{-ZrC-SiC-C/SiC}$ 体系线烧蚀速率
Fig.8 Linear ablation rate of $\text{HfO}_2\text{-ZrC-SiC-C/SiC}$ system at different temperature

3 结论

1) 基于能量、质量方程和湍流模型建立了航天器高温燃气拉法尔喷管烧蚀模型,并计算了喷管沿轴线方向变化的烧蚀速率。与文献对比验证了模型的准确性,并进行校正。计算了 Hf 系、Zr 系涂层的烧蚀行为,分析了各涂层的抗烧蚀性能,发现涂层材料自身的稳定性是影响线烧蚀速率的重要因素。 HfO_2 最适宜作为复合涂层体系最外层。

2) 分别建立了单层 SiC 涂覆、双层 ZrC-SiC 涂覆、三层 $\text{HfO}_2\text{-ZrC-SiC}$ 涂覆 C/SiC 基体的复合涂层体系,计算了各体系的线烧蚀速率。发现三层涂层的线烧蚀率比前两者降低了 10.5%,收敛段烧蚀率的有效降低体现了燃气气氛中 HfO_2 自身不可反应的稳定性,能够更好地隔绝氧化性气氛的侵蚀。

3) 计算了 $\text{HfO}_2\text{-ZrC-SiC-C/SiC}$ 体系不同温度下的线烧蚀速率,各温度梯度下的最大烧蚀速率分别提升 174%、20.22%、18.04%。对最大线烧蚀速率区域的迁移现象进行了分析,温度不仅会提高热化学反应烧蚀速率,而且提高了涂层材料的机械剥蚀速率,并成为烧蚀的主要机制。

参考文献:

- [1] 马青松, 刘海韬, 潘余, 等. C/SiC 复合材料在超燃冲压发动机中的应用研究进展[J]. 无机材料学报, 2013, 28(3): 247-255.
MA Qing-song, LIU Hai-tao, PAN Yu, et al. Research progress on the application of C/SiC composites in scramjet[J]. Journal of inorganic materials, 2013, 28(3): 247-255.
- [2] 段丽慧, 林文松, 杨国良, 等. 3D-C_f/SiC 陶瓷基复合材料研究进展[J]. 材料导报, 2014, 28(15): 40-43.
DUAN Li-hui, LIN Wen-song, YANG Guo-liang, et al. Research development of 3D-C_f/SiC ceramic matrix composite[J]. Materials review, 2014, 28(15): 40-43.
- [3] 殷晓光. C/SiC 陶瓷基复合材料的力学及高温性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2011.
YIN Xiao-guang. Study on mechanic and high-temperature properties of C/SiC ceramic based composites[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.
- [4] PATEL M, KIRAN M P S, KUMARI S, et al. Effect of oxidation and residual stress on mechanical properties of SiC seal coated C/SiC composite[J]. Ceramics international, 2017, 44(2): 1633-1640.
- [5] MEI H, ZHANG D, XIA J, et al. The effect of hole defects on the oxidation behaviour of two-dimensional C/SiC composites[J]. Ceramics international, 2016, 42(14): 15479-15484.
- [6] FAHRENHOLTZ W G, HILMAS G E. Ultra-high temperature ceramics: Materials for extreme environments[J]. Scripta materialia, 2017, 129: 94-99.
- [7] HUANG L, XIANG Y, CAO F, et al. The degradation behavior of UHTCs based coatings coated PIP-C/SiC composites in thermal cycling environment[J]. Composites part B: Engineering, 2016, 86: 126-134.
- [8] 陈博, 张立同, 成来飞, 等. 3D C/SiC 复合材料喷管在小型固体火箭发动机中的烧蚀规律研究[J]. 无机材料学报, 2008, 23(5): 938-944.
CHEN Bo, ZHANG Li-tong, CHENG Lai-fei, et al. Ablation characteristic of 3D C/SiC composite nozzle in a small solid rocket motor[J]. Journal of inorganic materials, 2008, 23(5): 938-944.
- [9] YANG X, WEI L, SONG W, et al. Ablative property of ZrC/SiC multilayer coating for PIP-C/SiC composites under oxy-acetylene torch[J]. Ceramics international, 2012, 38(4): 2893-2897.
- [10] WANG Y L, XIONG X, LI G D, et al. Ablation behavior of HfC protective coatings for carbon/carbon composites in an oxyacetylene combustion flame[J]. Corrosion science, 2012, 65(12): 549-555.
- [11] BIANCHI D, NERIZ A. Numerical simulation of chemical erosion in VEGA launcher solid-propellant rocket motor nozzles[J]. Journal of propulsion & power, 2015, 34(2): 1-17.
- [12] THAKRE P, RAWAT R, CLAYTON R, et al. Mechanical erosion of graphite nozzle in solid-propellant rocket motor[J]. Journal of propulsion and power, 2013, 29(3): 593-601.
- [13] SHENG Z, HUI T, PENGFEI W, et al. Steady-state coupled analysis of flowfields and thermochemical erosion of C/C nozzles in hybrid rocket motors[J]. Science China technological sciences, 2015, 58(3): 574-586.
- [14] WANG S L, LI K Z, LI H J, et al. Effects of microstructures on the ablation behaviors of ZrC deposited by CVD[J]. Surface and coatings technology, 2014, 240:

- 450-455.
- [15] WANG Y, LI H, FU Q, et al. SiC/HfC/SiC ablation resistant coating for carbon/carbon composites[J]. Surface and coatings technology, 2012, 206(19-20): 3883-3887.
- [16] WANG Y, CHEN Z, YU S J. Ablation behavior and mechanism analysis of C/SiC composites[J]. Journal of materials research and technology, 2016, 5(2): 170-182.
- [17] 何洪庆, 严红. EPDM 的烧蚀模型[J]. 推进技术, 1999, 20(4): 36-39.
HE Hong-qing, YAN Hong. Ablation model of EPDM[J]. Journal of propulsion technology, 1999, 20(4): 36-39.
- [18] 邹杰. 富氧环境下 C/SiC 复合材料的非稳态烧蚀研究[D]. 哈尔滨市: 哈尔滨工程大学, 2014.
ZOU Jie. Transient ablation investigation of C/SiC composite material in oxygen-rich environment[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2014.
- [19] 王玲玲, 吴玉燕, 嵇阿琳, 等. 固体冲压发动机环境下 C/C-SiC 喷管的烧蚀行为及重复性使用分析[J]. 复合材料学报, 2017, 34(7): 1569-1574.
WANG Ling-ling, WU Yu-yan, JI A-lin, et al. Ablation behavior and repetitive-use analysis of the C/C-SiC composites nozzle for solid propellant ramjet[J]. Acta materiae compositae sinica, 2017, 34(7): 1569-1574.
- [20] CROSS P G, BOYD I D. Two-dimensional modeling of ablation and pyrolysis with application to rocket nozzles[J]. Journal of spacecraft and rockets, 2017, 54(1): 212-224.
- [21] SUN W, XIONG X, HUANG B Y, et al. ZrC ablation protective coating for carbon/carbon composites[J]. Carbon, 2013, 77(14): 25-30.
- [22] LI K Z, SHEN X T, LI H J, et al. Ablation of the carbon/carbon composite nozzle-throats in a small solid rocket motor[J]. Carbon, 2011, 49(4): 1208-1215.
- [23] LI K, LIU G, ZHANG Y. Ablation properties of HfB₂ coatings prepared by supersonic atmospheric plasma spraying for SiC-coated carbon/carbon composites[J]. Surface and coatings technology, 2019, 357: 48-56.
-
- (上接第 296 页)
- [12] 邓聚龙. 灰色系统理论教程[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990.
DENG Ju-long. Grey system theory tutorial[M]. Wuhan: Central China Polytechnic University Press, 1990.
- [13] LIN Chin-tsai, CHANG Che-wei, CHEN Chie. The worst ill-conditioned silicon wafer slicing machine detected by using grey relational analysis[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2006, 31(4): 388-395.
- [14] 钟海智, 陈富强, 陈哲华, 等. 基于灰色关联度分析的广东省林业产业结构研究[J]. 林业调查规划, 2018, 43(4): 145-149.
ZHONG Hai-zhi, CHEN Fu-qiang, CHEN Zhe-hua, et al. Forestry industrial structure in Guangdong Province based on grey relational analysis[J]. Forest inventory and planning, 2018, 43(4): 145-149.
- [15] ODDO J E, TOMSON M B. Simplified calculation of CaCO₃ Saturation at high temperatures and pressures in brine solutions[J]. Journal of petroleum technology, 1982, 34(7): 1583-1590.
- [16] 王晓鹏, 王啸, 修海媚, 等. 渤海某油田 F 井旁路管腐蚀失效研究[J]. 表面技术, 2016, 45(5): 104-110.
WANG Xiao-peng, WANG Xiao, XIU Hai-mei, et al. Corrosion failure of bypass pipe of well F in bohai oilfield[J]. Surface technology, 2016, 45(5): 104-110.
- [17] 李桢, 孙阳超, 郭蒙蒙, 等. N80、45[#]、20[#]钢在京 11 区块注入水中的腐蚀规律[J]. 表面技术, 2016, 45(11): 99-105.
LI Zhen, SUN Yang-chao, GUO Meng-meng, et al. Corrosion law of N80, 45[#] and 20[#] steels in injected water of Jing 11 block[J]. Surface technology, 2016, 45(11): 99-105.
- [18] 李炳军, 朱春阳, 周杰. 原始数据无量纲化处理方法对灰色关联序的影响[J]. 河南农业大学学报, 2002, 36(2): 199-202.
LI Bing-jun, ZHU Chun-yang, ZHOU Jie. Effects of non-dimensional quantities of original data on grey incidence order[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2002, 36(2): 199-202.
- [19] 张立刚, 闫立鹏, 曲思凝, 等. 基于模糊物元法的煤层气有利开发区优选[J]. 数学的实践与认识, 2018, 48(14): 215-221.
ZHANG Li-gang, YAN Li-peng, QU Si-ning, et al. The CBM favorable zone selection based on fuzzy matter-element method[J]. Mathematics in practice and theory, 2018, 48(14): 215-221.
- [20] 李静, 张雪娜, 包卓. 基于模糊物元的水利水电工程绿色施工评价[J]. 水电能源科学, 2017, 35(3): 158-162.
LI Jing, ZHANG Xue-na, BAO Zhuo. Study on green construction evaluation of water resources and hydropower projects based on fuzzy matter-element theory[J]. International journal hydroelectric energy, 2017, 35(3): 158-162.
- [21] 张玄奇. 模糊物元精细评价方法在油水井酸化选井选层中的应用[J]. 兰州大学学报, 2004(5): 83-86.
ZHANG Xuan-qi. The application of a fuzziness unit fine evaluation method in selecting a well and a layer of acidification[J]. Journal of Lanzhou University (Natural science), 2004(5): 83-86.
- [22] 杨斯玲, 杨小云, 刘应宗. 模糊物元模型在生态林项目效益评价中的应用研究[J]. 电子科技大学学报(社科版), 2013, 15(3): 37-41.
YANG Si-ling, YANG Xiao-yun, LIU Ying-zong. Application of fuzzy matter-element model to the benefit evaluation of ecological forestry project[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China (Social sciences edition), 2013, 15(3): 37-41.