

文章编号: 1000-324X(2008)03-0501-08

炭 / 碳化硅复合材料在高温燃气环境中的铰链传动与摩擦行为

张亚妮, 张立同, 成来飞, 徐永东

(西北工业大学 材料学院超高温结构复合材料国防重点科技实验室, 西安 710072)

摘 要: 采用化学气相渗透法 (CVI) 制备了二维碳纤维增强碳化硅 (C/SiC) 全陶瓷基复合材料铰链试样. 高温燃气风洞实现了铰链试样在 1800°C 高温氧化气氛中传动与摩擦行为的试验模拟. 基于耦合应力等效模拟系统的开发, 采用摩擦力矩的变化表征材料的传动与摩擦行为. 对比分析了材料在室温与高温下以传动为背景的高载荷、低转速摩擦磨损行为及机理. C/SiC 复合材料铰链试样在高温燃气环境中稳定的摩擦力矩和对滑动时间的不敏感, 验证了材料在高温下更稳定、更可靠的高温摩擦性能及热承载能力. 高温下表面生成的氧化反应膜通过应力的重新分布起到有效的保护与润滑作用.

关 键 词: 炭 / 碳化硅 (C/SiC) 复合材料; 化学气相渗透 (CVI); 摩擦; 传动; 高温燃气环境

中图分类号: TB323 **文献标识码:** A

Transmitting and Friction Behavior of a Carbon/silicon Carbide Composite Hinge in High Temperature Combustion Environment

ZHANG Ya-Ni, ZHANG Li-Tong, CHENG Lai-Fei, XU Yong-Dong

(Department of Materials Science, National Key Laboratory of Thermostructure Composite Materials, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710072, China)

Abstract: An all-ceramic hinge based on the two dimensional carbon fiber reinforced silicon carbide matrix (C/SiC) composites was prepared by chemical vapor infiltration. The high temperature combustion wind tunnel realized simulation of the transmitting and friction behavior of the hinge at 1800°C in an oxidizing atmosphere. Based on the coupling stress equivalent simulation system, a characterization method with the change of torque was proposed to evaluate the friction behavior. The friction and wear behavior as well as wear mechanism were studied both at high temperatures in combustion environment and at room temperature in air. The results indicate that the friction torque is stable and insensitive to the sliding time at high temperatures, which demonstrates stable and reliable friction property and thermal load-carrying ability of the hinge. The tribochemical reaction products on contact surface may moderate the stress distribution by providing a reaction layer for wear protection and lubrication.

Key words: carbon/silicon carbide composites; chemical vapor infiltration; friction; transmitting; high temperature combustion environment

1 引言

宇宙飞船与空间飞行器的构件中有许多涉及到滑动接触与滚动接触的滑动轴承或滚动轴承等. 很多摩擦元件需要在再入大气过程中承受高机械与

气动载荷, 并且以较低的转速在高速气流中运行, 例如 X-38 全陶瓷组合襟翼的铰链轴承构件. 由于能量的限制, 这些摩擦元件需要在较低的转速下以较小的摩擦力运行, 另外必须既能在空间环境的真空条件下又能在大气气氛中运行^[1,2]. 当跨大气层

收稿日期: 2007-06-13, 收到修改稿日期: 2007-08-23

基金项目: 国家自然科学基金重大项目 (90405015); 国家杰出青年科学基金 (50425208)

作者简介: 张亚妮 (1981-), 女, 博士研究生. E-mail: snow@mail.nwpu.edu.cn

飞行器以极高速度 (~ 25 马赫) 再入大气时, 空气与飞行器之间的剧烈的相互作用对飞行器产生强烈的气动加热, 使得平均表面温度约 1477°C , 最高温度可达 1800°C ; 另外高压气流以极高速度冲击飞行器对其产生极高的气动载荷^[3,4]. 如此复杂的再入环境对飞行器所用的材料也提出了苛刻的要求.

使用可承载、低密度陶瓷基复合材料 (CMC) 热结构被认为是可满足新一代及未来低成本、可重复、轻质热防护系统的最佳选择^[5-7]. CMC 热结构件是指在设计上既可满足轻质结构的设计标准又可承受极高温度与极端热载荷等苛刻条件而不会失效. 目前 CMC 结构在满足极端苛刻的再入飞行环境方面的应用已经在新一代美国 X 系列空间飞行器的襟翼、机翼前缘、方向舵、鼻锥等典型构件上得到验证^[7-9]. 如今 CMC 材料如碳纤维增强碳化硅 (C/SiC) 复合材料由于具有优良的耐磨损特性、良好高温稳定性、高温抗氧化性而引起了广泛关注^[10-13]. 近年来国外开展了一些用于刹车盘系统的 C/SiC 复合材料摩擦磨损性能的研究^[14], 主要是针对高速滑动条件下的摩擦行为^[15]. 然而关于再入环境下既作为热承载构件又作为摩擦元件的 C/SiC 复合材料摩擦磨损问题, 尤其是以传动为背景的高温、高载荷、低转速摩擦磨损行为的研究目前尚未见报道.

本工作通过高温燃气风洞结合应力环境的等效试验模拟实现了 C/SiC 复合材料铰链模拟件在 1800°C 高温燃气环境中的传动、热承载以及转动摩擦行为. 在耦合应力等效模拟系统的基础上, 研究摩擦力矩的变化与传动过程摩擦性能的关系. 通过对比分析室温及高温燃气环境下的摩擦性能与磨损形貌, 考察载荷、温度及氧化气氛对传动与摩擦行为的影响规律, 并讨论其摩擦磨损机理.

2 试验

2.1 用于铰链摩擦系统的 C/SiC 复合材料的制备

采用化学气相渗透 (CVI) 的方法制备了具有不同形状与尺寸的二维 C/SiC 复合材料试样. 具体的制备过程与参考文献^[16]中所描述的四个步骤相同. 最后轴的接触表面通过精加工最终满足配合精度与滑动摩擦的要求. 实验所采用的转动轴外径 $\phi 20\text{mm}$, 壁厚为 4mm ; 转动轴的长度为 120mm , 其中包含了两端用来定位以及与联轴器机械配合的尺寸. 静止摩擦环内径 $\phi 20\text{mm}$, 外径 $\phi 30\text{mm}$, 壁厚 5mm .

2.2 C/SiC 复合材料铰链试样在高温燃气环境中的传动与摩擦测试

通过自行研制的耦合应力等效模拟系统研究 C/SiC 复合材料在高载荷、低转速传动条件下的摩擦磨损行为. 图 1 给出了 C/SiC 复合材料在耦合应力环境中的测试原理图. 如图所示, 整个系统的夹具与摩擦试验的测试段采用全陶瓷 C/SiC 复合材料. 摩擦副由 C/SiC 复合材料静止环和 C/SiC 复合材料转动轴组成. 静止环嵌在加载板内, 转动轴通过两端定位并由传动装置带其转动. 夹具由上、下加载板以及左、右夹板连接组成. C/SiC 静止环与转动轴同时穿过左、上、下三个 C/SiC 夹板. 下加载板则与左右两个夹板通过 C/SiC 复合材料螺栓连接. 载荷由加载系统完成, 通过静环传递载荷可实现轴在转动过程中的法向加载. 试验过程中可对载荷、转速、摩擦扭矩, 以及测试室中的温度与气氛等参数进行控制与测试. 本模拟系统可实现同时加载与转动的滑动摩擦磨损行为, 如图 1 箭头所示. 这种应力环境下的摩擦行为既有材料本身因表面状态差异相互滑动产生的摩擦作用, 又有因材料变形所引起的摩擦作用. 实验针对既有材料变形又有材料摩擦磨损的应用环境, 采用摩擦扭矩对 C/SiC 复合材料在传动过程中摩擦行为进行表征, 可直接获取真实的试验数据, 避免了通过计算获得摩擦系数所带来的误差, 并且可以直观反映材料在传动背景下传递扭矩的能力.

高温燃气环境通过自行研发的综合地面等效模拟系统实现. 该系统包含一个由电脑自动控制的高温燃气风洞、一套加载装置 (Model Instron 8801 from Instron Ltd., High Wycombe, UK)、以及一套自行研发的用以实现铰链传动与摩擦的转动驱动

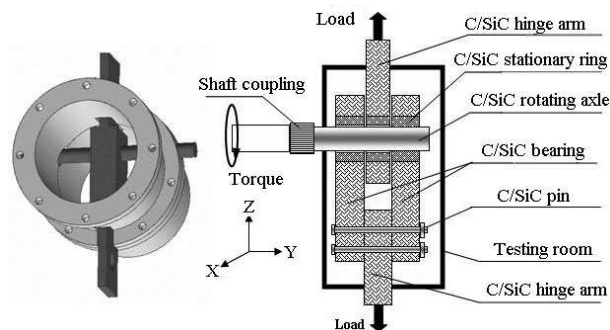


图 1 C/SiC 复合铰链试样在耦合应力等效试验模拟系统中的传动与摩擦行为测试示意图

Fig. 1 Schematic of the coupling stress equivalent simulation system for transmitting and friction tests of C/SiC based hinge bearing

装置. 原理图如 Zhang 等在文献 [17] 中所描述. 燃气风洞的均匀温度场直径约 60mm, 燃气流速为 20m/s, 可实现 600~1800°C 高温. 采用红外测温仪与铂铑合金热电偶对比测定的方法进行了温度标定. 燃气风洞气源为甲烷, 氧气和氮气. 高温燃气产物为富氧气氛, 除了参与甲烷燃烧的氧气另外保证通入额外氧气, 燃气成分为: O_2 (质量含量 20%, 分压 $P_{O_2} \approx 17\text{kPa}$), 水蒸气 H_2O (22%~35%, 分压 $P_{H_2O} \approx 34.5 \sim 55\text{kPa}$), 二氧化碳 CO_2 (30%~45%), 以及少量一氧化碳与氮气. 燃气总压强为 100kPa. 模拟的高温燃气环境与真实再入大气环境具有很多类似: 环境温度达到甚至超过飞行器再入的最高温度, 氧化气氛特别是氧含量与实际环境一样. 不同之处在于水蒸气的分压远远大于实际再入气氛, 其目的在于考察材料在这种水氧耦合苛刻条件下的环境行为是否可以与真实环境中原子氧和原子氮的腐蚀实现等效.

本实验 C/SiC 复合材料铰链试样在高温燃气环境中的传动与摩擦行为测试在 1800°C 条件下进行. 恒定载荷下测试时, 转动轴转速为 32r/min; 在进行循环载荷下测试时, 加载频率为 0.01Hz, 上下加载板的加载范围为 5~15kN, 试验时间 30min, 转动轴转速 32r/min, 试验过程中自动采集载荷与摩擦力矩数据.

2.3 密度测试与形貌观察

采用阿基米德法测试 C/SiC 复合材料的密度. 采用光学显微镜 (Nikon SMZ1000), 扫描电子显微镜 (SEM, HITACHI-S-2700), 以及原子力显微镜 (AFM, Molecular Imaging) 对 C/SiC 复合材料铰链摩擦副在高温燃气环境中进行传动与摩擦试验后的磨损表面形貌和粗糙度进行了测试.

3 结果分析与讨论

3.1 C/SiC 复合材料的力学性能及铰链试样在高温燃气环境中的温度场分析

采用化学气相渗透法制备的二维 C/SiC 复合材料的密度约 2.05g/cm^3 , 气孔率约 12%. 表 1 列出了室温下 2D-C/SiC 复合材料的力学性能测试结果. 复合材料失效行为的差异主要与纤维与基体之间的界面结合有关. 在化学气相浸渗过程中, 每根纤维单丝的表面均匀覆盖一层热解炭界面层, 可保证 SiC 基体和纤维之间适当的界面结合强度, 有效传递载荷和缓解纤维和基体之间的应力集中, 保证在断裂过程中纤维的拔出. 在断裂过程中的纤维拔出

现象表明了材料的非脆性与非灾难性失效行为. 对于二维 C/SiC 复合材料, 由于在垂直于炭布叠层的厚度方向上没有引入纤维的结构特点, 致使其拉伸、弯曲以及压缩强度较高, 而层间剪切强度较低. 其拉伸、弯曲及压缩强度分别为 245、405 和 360MPa, 剪切强度为 28MPa.

虽然标定高温燃气风洞中燃气的环境温度为 1800°C, 但是在试验过程中不能说明整个 C/SiC 复合材料铰链试样的温度也是恒定的 1800°C. 针对 C/SiC 复合材料铰链试样在高温燃气环境中的温度场分布进行了模拟计算. 计算过程中用到数据如表 1 中所示, 其计算结果如图 2 所示. 结果发现在 C/SiC 复合材料铰链试验件中, 静止环与转动轴所处的温度场约在 800~1300°C 范围.

3.2 恒定载荷下 C/SiC 复合材料的传动与摩擦

如图 1 中所示, C/SiC 复合材料铰链试样中, 转动轴与静止环之间的接触可以看作是两个轴线平行的铰链圆柱销与凹面圆柱孔的接触问题. 两个接触表面的接触状态直接关系到两个相对滑动的接触表面之间摩擦阻力的大小, 从而引起传动过程中铰链力矩的变化.

图 3(b) 给出了室温下 C/SiC 复合材料铰链试样在图 3(a) 的恒定载荷下的摩擦力矩随滑动时间的变化. 当载荷线性增长到 6kN 时, 摩擦力矩也线性增长到约 25N·m. 500s 后当载荷保持恒定, 摩擦力矩呈下降趋势, 且在较宽范围内波动. 这主要与铰链摩擦副的转动轴与静止环两个新鲜接触表面之间的磨合过程有关. 表面磨合的程度与接触应力以及材料在不同尺寸范围内的断裂过程有关. 只要

表 1 2D-C/SiC 复合材料的力学性能

Table 1 Properties of the 2D-C/SiC composites

Items	Results at r. t.
Density/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	2.05
Open porosity/%	12
Tensile strength/MPa	245
Flexural strength/MPa	405
Compression strength/MPa	360
Inter-laminar shear strength/MPa	28
Young's modulus/GPa	60
Coefficient of thermal expansion \parallel / $\times 10^{-6}/\text{K}$	2
Coefficient of thermal expansion \perp / $\times 10^{-6}/\text{K}$	5

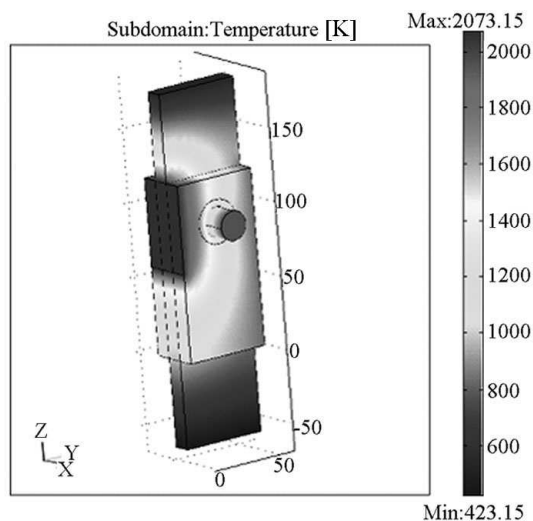


图 2 C/SiC 复合材料铰链在高温燃气环境中进行试验时的温度场分布模拟计算结果

Fig. 2 Calculation result of C/SiC Composite hinge tested in a high temperature combustion environment

载荷不超过系统的临界值, 载荷提高会改善磨合质量, 容易形成光滑表面, 但磨合时间较长; 随应力

增大, 磨合时间变短; 当载荷超过系统临界承载能力时, 则很可能使表面的磨合过于剧烈而得不到好的磨合表面, 或使磨合失败^[18,19].

图 3(d) 给出了 C/SiC 复合材料铰链试样在 1800°C 高温燃气环境中进行恒定载荷 (如图 3(c) 所示) 试验时的摩擦力矩与滑动时间的关系. 当载荷线性增加时铰链摩擦力矩也以线性关系增长. 与室温不同的是, 当载荷 17kN 恒定时摩擦力矩依然保持在恒定范围 (10~25N·m). 在恒定载荷高温下的摩擦力矩对时间不敏感, 摩擦力矩只在初始载荷达到最大时出现一个峰值, 之后保持在恒定范围.

3.3 循环载荷下 C/SiC 复合材料的传动与摩擦

为了模拟一些既作为热结构承载件又作为摩擦元件的材料在高循环载荷及高温下并且以较低转速转动时的摩擦行为, 本实验对比分析了 C/SiC 复合材料在室温与 1800 °C 高温燃气环境下给定相同的循环载荷时传动与摩擦行为, 如图 4 所示. 载荷在 5~15kN 范围内以正弦波形式加载如图 4(a) 所示, 发现室温与高温下的摩擦力矩大小、波幅及变化规律不同. 如图 4(b) 所示, 室温下的摩擦力矩在

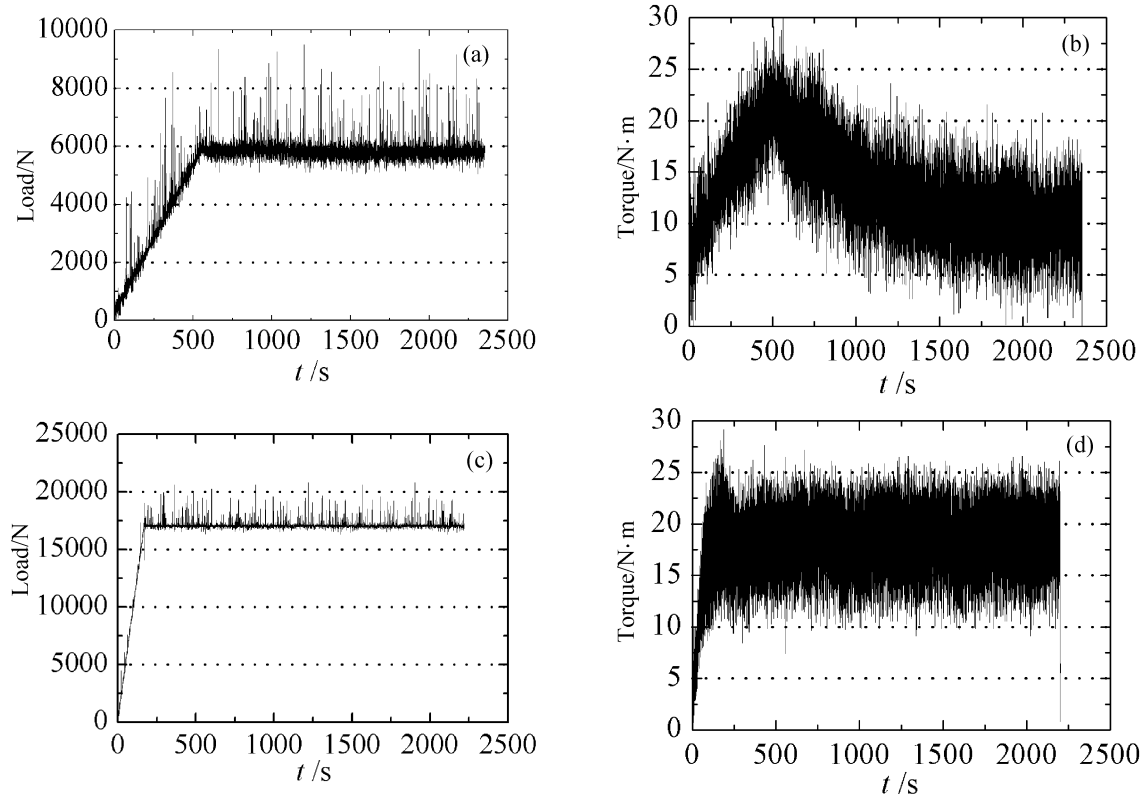


图 3 对比 C/SiC 复合材料铰链试样在高温燃气环境和在室温下进行恒定载荷时的摩擦力矩与滑动时间的关系

Fig. 3 Relationship of friction torque *versus* sliding time of the C/SiC composites axle under constant loading condition at high temperatures in combustion environment and at room temperature in air

(a) Load at room temperature; (b) Torque at room temperature; (c) Load at high temperature; (d) Torque at high temperature

第一个循环达到最大值 $25\text{N}\cdot\text{m}$ 后逐渐减小, 5 个循环后趋于平稳, 由初始的 $0\sim 25\text{N}\cdot\text{m}$ 变为 $0\sim 10\text{N}\cdot\text{m}$. 这主要与室温下摩擦副接触表面之间的磨合过程有关. 摩擦力矩对滑动时间敏感. 随滑动时间的增长摩擦力矩逐渐衰减, 变得对载荷不敏感. 室温条件下, C/SiC 复合材料在高的循环载荷作用下需要约 $15\sim 20\text{min}$ 达到磨合状态.

如图 4(c) 所示, 在高温燃气环境下进行的铰链传动与摩擦试验, 发现在初始接触状态下载荷达到最大 15kN 时摩擦力矩达到最大 $25\text{N}\cdot\text{m}$, 第二个循环加载时力矩减小. 与室温下不同的是, 高温下的摩擦力矩并没有随载荷循环次数的增加而减小, 力矩保持在 $0\sim 25\text{N}\cdot\text{m}$. 为了考察 C/SiC 复合材料在燃气环境中摩擦时系统对滑动时间的敏感性以及传动与摩擦的可靠性, 继续在高温燃气环境下进行 30min 试验, 如图 4(d) 所示. 在循环应力作用下摩擦力矩以正弦波形式保持在 $5\sim 25\text{N}\cdot\text{m}$ 恒定范围. 摩擦力矩对载荷敏感, 而对滑动时间不敏感, 表现出稳定的传动与摩擦性能. 发现相同滑动

时间内, 高温燃气环境中接触表面更容易达到磨合状态, 时间缩短为 $5\sim 6\text{min}$, 是室温条件下所需要时间的 $1/3\sim 1/4$. 因此, 高温燃气环境下, C/SiC 复合材料传动与摩擦性能稳定, 对时间不敏感, 载荷与环境是影响传动与摩擦性能的主要因素.

通过循环载荷下的对比试验发现, C/SiC 复合材料对温度表现出良好的适应过程, 在高温下的传动与摩擦性能比室温更加稳定、可靠, 高温下的循环寿命更长, 并且铰链摩擦副在高温下对滑动时间不敏感, 摩擦力矩保持在恒定范围内.

3.4 C/SiC 复合材料铰链摩擦副的磨损表面形貌

通常固体表面大都会被吸附物、氧化物或其它污染物所覆盖. 表面吸附层的存在改变了表面物理和化学特性. 在许多滑动摩擦过程中, 表面吸附膜可以大大缓解摩擦过程中再粘着现象, 从而显著降低摩擦与磨损. 燃气环境中水蒸气的存在, 使接触表面的吸附膜中存在水蒸气, 有利于滑动过程中的润滑; 而水分子和氧分子又会与 SiC 磨屑及 SiC 涂层晶体发生氧化反应, 因此, 接触表面上既

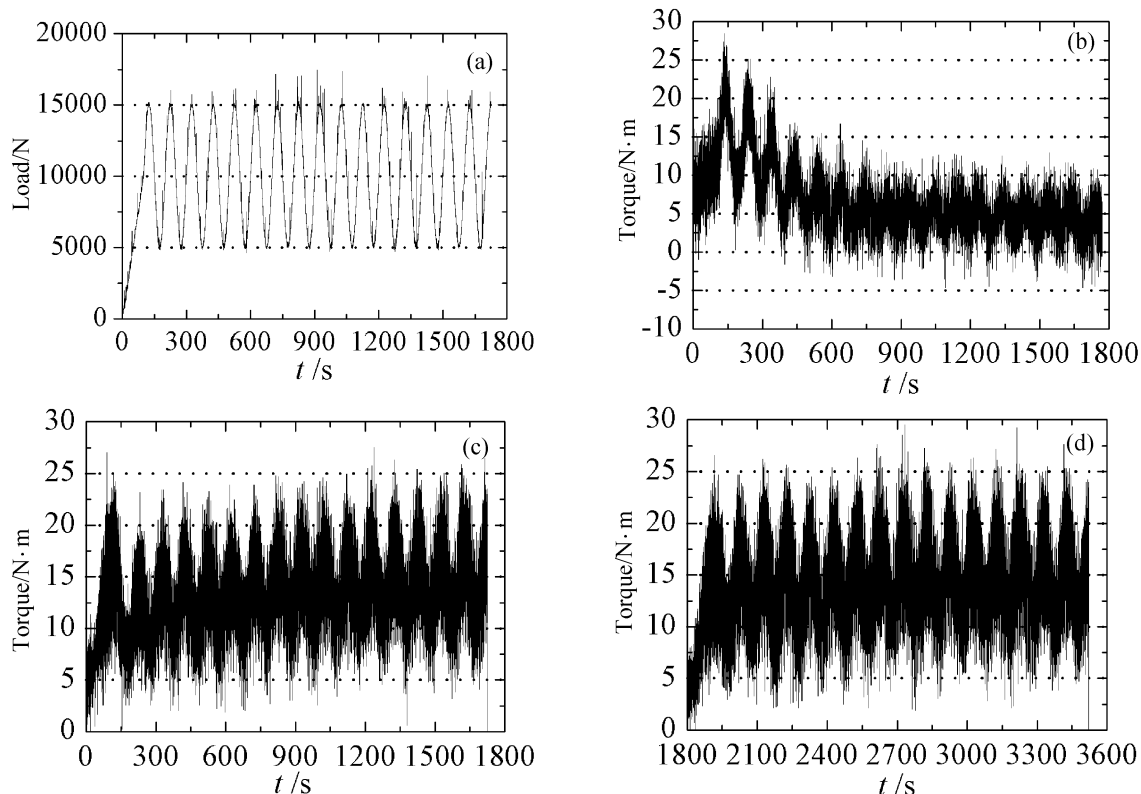


图 4 C/SiC 复合材料铰链试样在高温燃气及室温环境中进行循环载荷试验时的摩擦力矩与滑动时间关系

Fig. 4 Relationship of friction torque *versus* sliding time of the C/SiC composites axle under repetitive loading condition at high temperatures in combustion environment, comparing with that at room temperature

(a) Loading condition; (b) Torque at room temperature in air; (c) Torque at high temperatures in combustion environment; (d) Torque at high temperatures tested for another 30min

存在水蒸气、氧气的物理吸附,又存在参与氧化反应的化学吸附. C/SiC 复合材料铰链在高温燃气环境中进行传动与摩擦试验时,既有摩擦又有化学反应,化学反应降低摩擦磨损的作用是通过在摩擦表面生成稳定的反应保护膜实现. 根据前面温度场的分析静止环与转动轴表面接触部分的温度约 $800\sim 1300^{\circ}\text{C}$,这给材料在高温环境下氧化反应提供了充足条件. 暴露在燃气环境中的 SiC 涂层在 $800\sim 1300^{\circ}\text{C}$ 的氧化反应以生成 SiO_2 的被动氧化为主(如反应式 1~3),因此表面随着滑动时间的增长会逐渐生成一层 SiO_2 氧化膜. 另外由于两个表面的接触峰因局部应力过大而发生的断裂形成磨粒,磨粒增加了材料的比表面积,加快了表层材料在断裂、塑性变形、转移和粘着过程中的氧化,从而加速了接触表面摩擦化学膜的形成. 有研究表明,在氧化气氛或潮湿环境中摩擦表面氧化反应膜的形成能够通过生成一层保护膜从而降低材料的摩擦磨损作用^[18-21].

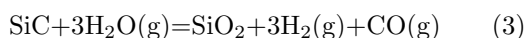
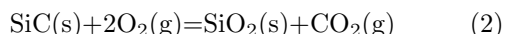
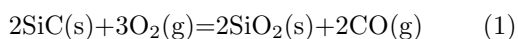


图 5 给出了 C/SiC 复合材料转动轴在高温燃气环境以及在室温下进行循环载荷下的传动与摩擦试验后其表面微观结构. 如图 5(a) 所示, C/SiC 复合材料轴在室温试验后的摩擦表面被大量粉状磨屑覆盖,这些磨屑是表面粗糙峰在高载荷作用下断裂形成. 室温下承载时,接触表面是 SiC 涂层,其硬度高、材料较脆,几乎很难发生塑性变形,在弹性接触范围内就会发生断裂破坏. 磨屑的形成不仅与载荷、速度等因素有关,而且对环境特别是环境湿度非常敏感^[20]. 如环境中的水分会使得那些被挤压成层状的磨屑颗粒之间发生粘连,这一粘连层有足够的粘附力从而可以通过重新分布接触应力来减小摩擦磨损. 在高温环境下,如图 5(b) 所示,转动轴表面光亮平滑,形成一层稳定均匀的摩擦膜. 放大观察,表面存在材料的塑性流动与扩展(如图 5(c) 所示). 能谱分析发现摩擦膜的物质组成为未被氧化的 SiC 颗粒与氧化产物 SiO_2 的混合物. SiC 因为温度升高而发生材料软化,较室温下更容易发生塑性变形. 表面的摩擦化学产物 SiO_2 氧化膜通过对表面接触应力的重新分布在一定程度上提供一层反应膜保护,从而降低摩擦阻力^[21].

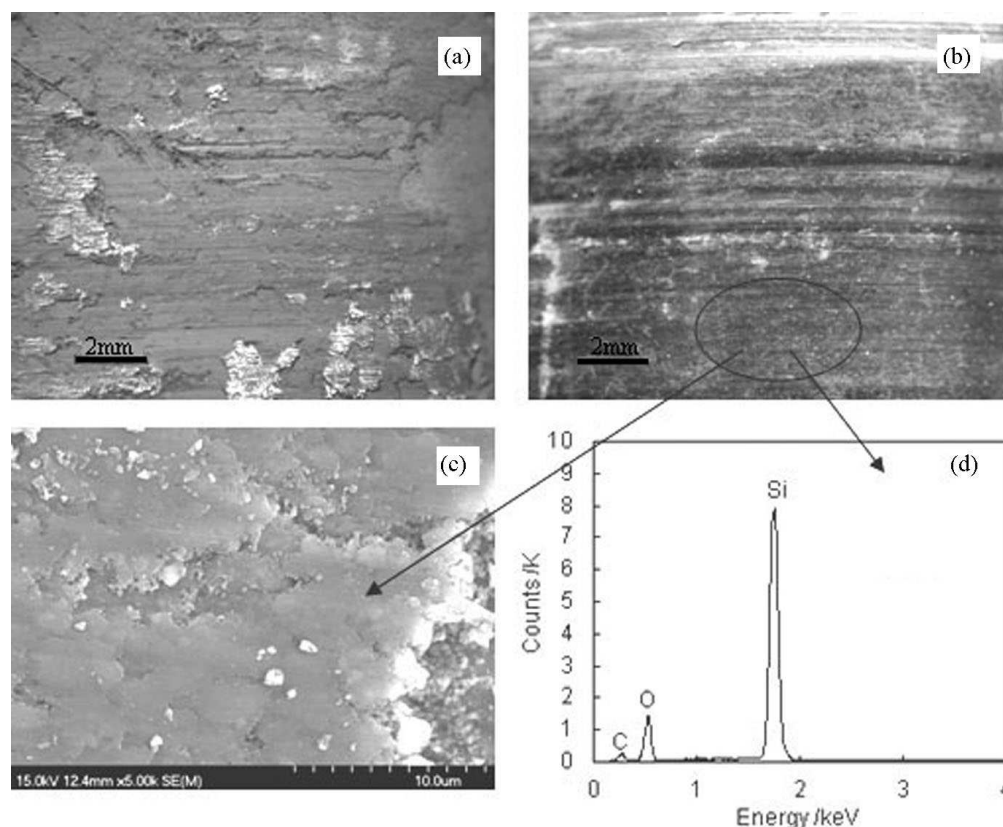


图 5 C/SiC 复合材料在室温及高温燃气环境下模拟循环载荷下铰链传动力与摩擦试验后的磨损表面形貌

Fig. 5 Microstructure of the worn surfaces of the C/SiC composites rotating axle after tested under cyclic loading

At high temperatures in combustion environment (b), (c) & (d) and at room temperature in air (a)

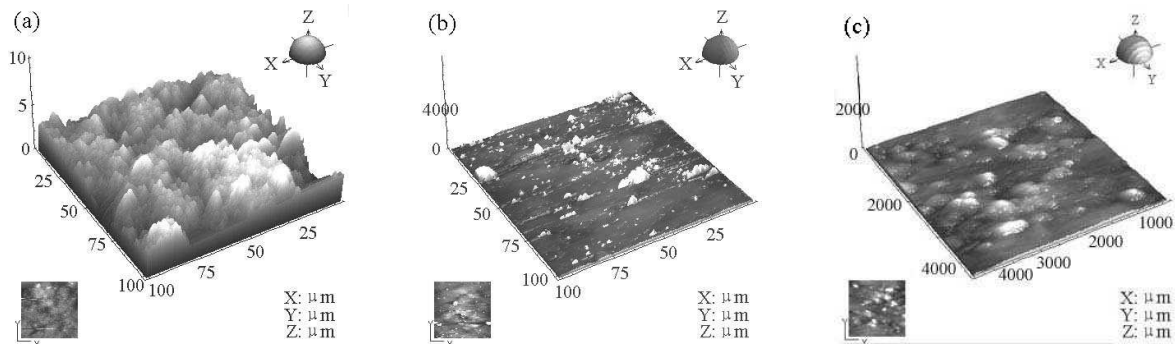


图 6 C/SiC 复合材料转动轴在高温燃气环境中进行传动与摩擦试验前后的表面原子力显微结构图

Fig. 6 AFM images on the surface of the C/SiC composites rotating axle before and after the transmitting and friction tests in the high temperature combustion environment

(a) Surface of the as-machined axle before test; (b) Smooth surface of axle after test in combustion environment; (c) local magnification of the smooth surface after test

如图 6(a) 所示, 试验前的加工表面由许多粗糙峰组成, 其粗糙度约为 $1.2\mu\text{m}$. 而经过高温燃气环境中的试验后, 试样表面被一层光滑密实且具有金属光泽的摩擦膜覆盖, 如图 6(b) 在显微镜下发现表面粗糙峰几乎被磨平, 表面几乎无磨屑, 表面粗糙度约为 $0.08\mu\text{m}$, 约是试验前的 $1/15$. 局部放大发现, 如图 6(c) 所示表面被一层光滑润泽的类似玻璃态物质的摩擦膜覆盖。

4 结论

1. 用化学气相渗透 (CVI) 的方法制备了力学性能与摩擦性能优良的二维 C/SiC 复合材料. 其密度约为 $2.05\text{g}/\text{cm}^3$, 气孔率约为 12%, 在断裂过程中表现出非脆性与非灾难性破坏行为, 弯曲强度约 405MPa .

2. 高温燃气风洞实现了铰链摩擦副在高温氧化气氛中的等效模拟, 燃气环境实现了 1800°C 高温及高的氧分压与水分压. 当高温燃气风洞的环境温度达到 1800°C 时, C/SiC 复合材料铰链摩擦副的温度场约为 $800\sim 1300^\circ\text{C}$.

3. C/SiC 复合材料的传动与摩擦性能通过摩擦力矩表征, 可直接反映材料传递力矩能力以及接触表面的摩擦行为. C/SiC 复合材料铰链摩擦副在高温燃气环境中表现出比室温下更可靠、更稳定的传动与摩擦行为. 在恒定载荷以及循环载荷两种试验条件下, 室温下的摩擦力矩随滑动时间逐渐下降并趋于平稳, 与表面磨合过程紧密联系; 而高温燃气环境下摩擦力矩对滑动时间不敏感, 一直保持在恒定范围。

4. 通过显微分析发现, 室温条件下磨损表面

被大量磨屑覆盖, 而高温试验后的表面几乎没有磨屑, 表面被一层光滑致密的化学反应摩擦膜覆盖, 表面粗糙度由试验前的 $1.2\mu\text{m}$ 减小到 $0.08\mu\text{m}$. 这主要与不同的摩擦磨损机理有关, 室温下的摩擦磨损由载荷及表层材料在不同尺寸范围内的断裂过程决定, 以磨粒磨损为主, 接触表面的磨合对传动与摩擦起主要作用; 而高温燃气环境中, 摩擦磨损过程与表层材料塑性变形与粘着、表面化学吸附与氧化反应生成的反应膜保护、水蒸气润滑等多种因素有关, 是氧化磨损与粘着磨损共同作用的复杂过程。

参考文献

- [1] Ortelt M, Weihs H, Fischer I, et al. *Ceram. Eng. Sci. Pro., ABI/INFORM Trade & Industry*, 2003, **24** (4): 281-287.
- [2] Robert L. Fusaro. 2001 Annual Meeting, Society of Tribologists and Lubrication Engineers, NASA/TM-2001-210806, Orlando, Florida, 2001, May 20-24.
- [3] 李思强. 载人飞船工程学概论. 北京: 科学出版社, 1985, 4: 160-162.
- [4] McCleskey S F, Strasser T E, French P A, et al. AIAA-2000-5311, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2000.
- [5] Wulz H G, Trabandt U. AIAA-97-2485, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1997.
- [6] Kladtke R, Puttmann N, Graf E D. AIAA 1999-99-4936, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1999.
- [7] Hald H, Weihs H. AIAA 2003-2696, International Air and Space Symposium and Exposition, 2003.
- [8] Muhlratzer A, Pfeiffer H. *Ceram. Eng. and Sci. Pro., ABI/INFORM Trade & Industry*, 2002, **23** (3): 331-338.
- [9] Ortelt M, Weihs H, Fischer I, et al. *Ceram. Eng. Sci. Pro., ABI/INFORM Trade & Industry*, 2003, **24** (4): 281-287.

- [10] Krenkel W, Heidenreich B, Renz R. *Adv. Eng. Mat.*, 2002, **4**: 427–436.
- [11] Pak Z S. *Key Eng. Mat.*, 1999, **164-165**: 820–825.
- [12] 张 均, 徐永东, 张立同, 等 (ZHANG Jun, *et al*). 无机材料学报 (Journal of Inorganic Materials), 2005, **20 (4)**: 889–893.
- [13] 张海军, 李文超, 姚 熹, 等 (ZHANG Hai-Jun, *et al*). 无机材料学报 (Journal of Inorganic Materials), 2000, **15 (3)**: 480–486.
- [14] Vaidyaraman S, Purdy M, Walker T, *et al.* *Key Eng. Mat.*, 1999, **164-165**: 802–808.
- [15] Paris J Y, Vincent L, Denape J. *Com. Sci. Tech.*, 2001, **61 (3)**: 417–423.
- [16] Zhang Y, Zhang L, Cheng L, *et al.* *J. Am. Ceram. Soc.*, 2007, **90 (4)**: 1139–1145.
- [17] Zhang Y, Zhang L, Cheng L, *et al.* *J. Am. Ceram. Soc.*, 2007, **90 (8)**: 2630–2633.
- [18] Wang Y, Hsu S M. *Wear*, 1996, **195 (1-2)**: 112–122.
- [19] Zhou Y, Hirao K, Yamauchi Y, *et al.* *J. Am. Ceram. Soc.*, 2003, **86 (6)**: 991–1002.
- [20] Fischer T E, Zhu Z, Kim H, *et al.* *Wear*, 2000, **245**: 53–60.
- [21] Park D S, Danyluk S, McNallan M J. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1992, **75 (11)**: 3033–3039.