

文章编号: 1000-324X(2007)02-0298-07

C/SiC 复合材料在传动过程中的摩擦磨损行为

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) 陶瓷基复合材料. 基于耦合应力等效模拟系统的开发, 采用摩擦扭矩的变化表征传动过程的摩擦磨损性能. 研究了以传动为背景的高载荷、低转速摩擦磨损行为及机理. C/SiC 复合材料以其较低的摩擦扭矩、低的磨损率特别是在高载荷下的较小变形验证了良好的耐磨特性以及承载能力. 相同条件下其磨损率只有 Ti 合金的 1/10~1/20. 低转速下磨损机理以磨粒磨损为主, 高载荷没有引起表面热裂纹.

关键词: 碳 / 碳化硅 (C/SiC) 复合材料; 化学气相渗透 (CVI); 传动; 摩擦性能

中图分类号: TB323 **文献标识码:** A

Friction and Wear Behavior of Carbon/Silicon Carbide Composites under Transmitting Motion

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: The two dimensional carbon fiber reinforced silicon carbide matrix (C/SiC) composites were prepared by a chemical vapor infiltration method. Based on the coupling stress equivalent simulation system, a characterization method with the change of torque was proposed to evaluate the friction behavior under transmitting motion. The friction and wear behavior and wear mechanism of C/SiC composites under high load and low rotation velocity based on transmitting motion were studied. Results show that a good wear resistance and load-carrying ability is demonstrated by the low friction torque, low wear rate and small material deformation under high loads. Under the same testing condition, the wear rate of C/SiC composites is only 1/10–1/20 of that of Ti alloy. The wear behavior on contact surface is mainly grain-abrasion mechanism under low rotation velocity, and no hot cracking is caused by the high loads during tests.

Key words carbon/silicon carbide composites; chemical vapor infiltration; transmitting motion; friction property

1 引言

使用可承载、低密度陶瓷基复合材料热结构被认为是可满足第二代以及未来低成本、可重复、轻质热防护系统的最佳选择^[1-3]. 陶瓷基复合材料 (CMC) 热结构件是指在设计上既可以满足轻质结构的标准又可以承受极高的温度与热载荷等服役

环境而不会失效. 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 系列空天飞行器的襟翼、机翼前缘、方向舵、鼻锥等典型构件上得到验证^[3-5]. 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

收稿日期: 2006-04-05, 收到修改稿日期: 2006-08-28

基金项目: 国家自然科学基金重大计划重点项目 (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

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^[5,6]. 陶瓷基复合材料例如碳纤维增强碳化硅 (C/SiC) 复合材料由于具有优异的耐高温以及耐磨损特性而引起了广泛关注^[7-10]. 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^[11], 主要是针对高速滑动条件下的摩擦行为^[12]. 然而关于再入环境下作为热承载结构件的 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.

本工作采用化学气相渗透 (CVI) 法制备了二维 C/SiC 复合材料. 在耦合应力等效模拟系统的基础上, 研究扭矩的变化与传动过程摩擦磨损性能的关系. 考察 C/SiC 复合材料在以传动为背景下的摩擦行为及磨损表面形貌, 分析高载荷以及低转速对摩擦磨损行为的影响规律, 讨论高载荷下传动时的材料变形、磨损率以及磨损机理.

2 实验

2.1 C/SiC 复合材料制备

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. 具体的制备步骤如下. 第一步: 采用叠层或者缠绕的方式将二维碳布定型为所需形状的总体积分数为 40 面的试样半成品. 由于用作转动轴的空心圆柱试样的壁厚在 8~15mm 范围内, 因此需要严格控制试样的厚度均匀性, 同时还需要控制纤维的含量. 第二步: 准备好的纤维预制体进行热解碳沉积, 沉积厚度约 200nm, 从而得到 C/C 复合材料. 之后对制备的 C/C 复合材料进行石墨化预处理. 处理温度为 1800℃, 时间为 2h. 第三步: 对制备好的 C/C 复合材料渗透 CVI 的 SiC 基体得到 C/SiC 复合材料. 其中氢气以鼓泡方式作为载体将三氯甲基硅烷 (MTS, CH_3SiCl_3) 气源带入沉积炉用作 SiC 基体的沉积. 化学气相渗透的温度为 1000℃. 第四步: 对 C/SiC 复合材料试样进行切削机加工、抛光等步骤达到最终尺寸, 同时要预留出防氧化 SiC 涂层的厚度. 随后通过化学气相沉积 (CVD) 的办法制备 SiC 涂层. 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; 静止摩擦环内径 $\phi 20\text{mm}$, 壁厚 5mm, 外径 $\phi 30\text{mm}$.

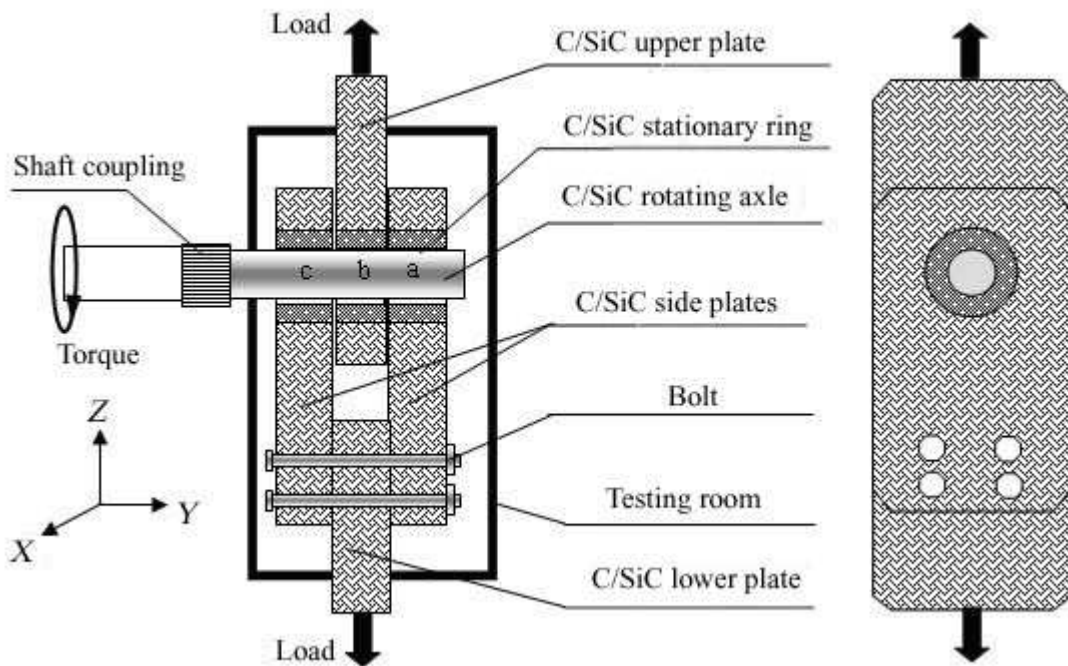


图 1 C/SiC 复合材料在耦合应力等效模拟系统中的摩擦试验原理图

Fig. 1 Schematic of friction behavior of C/SiC composite in the coupling stress equivalent simulation system

2.2 C/SiC复合材料的摩擦磨损行为测试

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。静止环是一根管子作为一个整体嵌在加载板内, 转动轴也是一根管子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。在试验过程中可以对载荷、转速、摩擦扭矩, 甚至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, 试验过程中上下加载板以相同大小的载荷进行拉伸, 并通过 C/SiC 复合材料夹具把载荷传递到环与轴上。通过更换静止摩擦环和转动轴可研究不同材料组合摩擦副的摩擦磨损行为。值得一提的是, 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。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。

本文在分析载荷对 C/SiC 复合材料摩擦扭矩的影响规律时, 采用最大载荷可达 6kN, 最低转速约 0.03m/s (32r/min)。在对比分析 C/SiC 复合材料与 Ti 合金以及钢的摩擦磨损性能时, 摩擦副在恒定转速下加载到 3kN 运行 300s(5min) 后, 测量材料的厚度磨损量。为了对比载荷对磨损率的影响, 测量了静环在 Z 与 X 两个方向的磨损率。而由于转动的作用, 转动轴在整个圆周方向上被循环磨损, 因此为了对比轴在径向的磨损均匀性, 测量了轴的最大与最小磨损量。磨损率 $\mu\text{m/r}$ 是指每转的材料厚度磨损率 (depth of materials removed per round), 即总磨损量除以 160r (5min \times 32/min=160r)。为了考察环与轴沿长度方向上的磨损均匀性, 沿长度方向取三个部位进行磨损测量。

2.3 密度测试与形貌观察

采用阿基米德方法测试 C/SiC 复合材料的密

度。采用扫描电子显微分析 (SEM, S-4700) 对 C/SiC 复合材料的拉伸、弯曲断口以及摩擦表面形貌进行了观察。

2.4 力学性能测试

采用 Instron-8871 试验机测试了二维 C/SiC 复合材料的拉伸、压缩以及剪切性能, 加载速率为 0.005mm/min。用以测试的试样取自初始制备的 C/SiC 复合材料块体。试样尺寸分别为: 拉伸试样 106mm \times 3mm \times 3.5mm, 压缩试样 20mm \times 10mm \times 3mm, 剪切试样 30mm \times 15mm \times 6mm。采用 SANS CMT-4304 试验机测试了材料的三点弯曲性能, 试样尺寸为 60mm \times 5mm \times 3.5mm。

3 结果分析和讨论

3.1 C/SiC复合材料的力学性能

采用化学气相渗透方法制备的二维 C/SiC 复合材料的密度约 2.03g/cm³, 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。图 2 为 C/SiC 复合材料在拉伸及弯曲载荷下失效的断口形貌。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。在化学气相渗透过程中, 由于纤维 / 纤维、纤维束 / 纤维束之间的孔隙存在中间大、两头小的瓶颈效应, 因此材料内部总是存在一定量的残留孔隙。复合材料内部残留孔隙的存在使得纤维束 / 纤维束之间呈弱界面结合, 在断裂过程中存在纤维束的拔出现象。在每根纤维单丝的表面均匀覆盖一层热解碳界面层, 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

表 1 2D-C/SiC复合材料的力学性能

Table 1 Mechanical properties of the 2D-C/SiC composites

Items	Unit	Results at RT
Density	g/cm ³	2.03
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

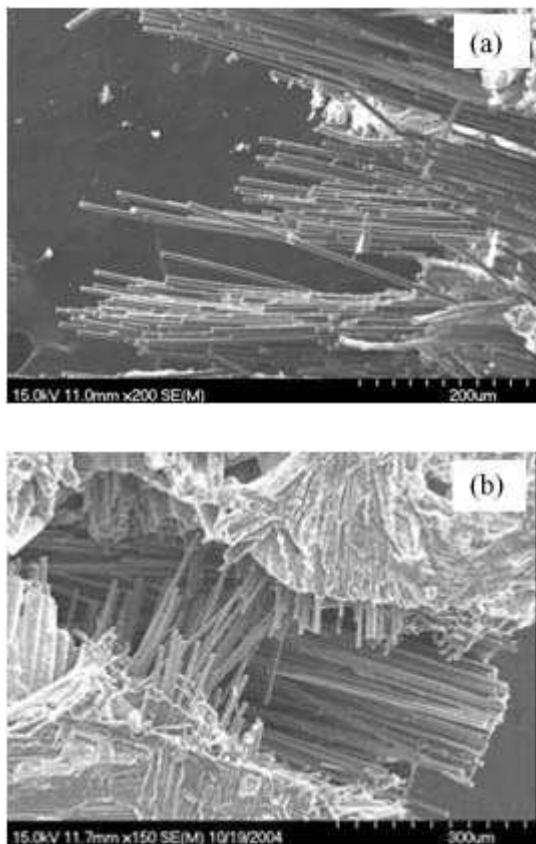


图 2 C/SiC 复合材料的断口 SEM 形貌

Fig. 2 SEM micrographs of fracture surfaces of C/SiC composites

(a) Pull-out of fiber cluster under tensile load; (b)

Pull-out of single fiber under flexural load

集中, 保证在断裂过程中纤维的拔出. 复合材料在从制备温度向室温降温以后沿纤维径向方向在界面产生拉应力, 因此纤维容易脱粘并从基体中拔出. 材料在拉伸与弯曲载荷作用下, 裂纹首先在碳化硅涂层中形成并进一步进行扩展. 如图 2 所示, 断口上纤维束拔出较长, 单丝纤维也有拔出现象, 说明材料以一种非脆性及非灾难性行为失效. 对于二维 C/SiC 复合材料, 由于在垂直于碳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.

3.2 载荷对 C/SiC 复合材料传动过程中摩擦行为的影响

静止环与转动轴都采用 C/SiC 复合材料构成摩擦副, 分析在恒定转速下, 载荷对 C/SiC 与 C/SiC 复合材料之间摩擦性能的影响. 如图 3 所示, 当转速为 32r/min, 载荷以 10N/s 的速度增大时, C/SiC 复合材料的摩擦扭矩随载荷增大而增大. 当载荷

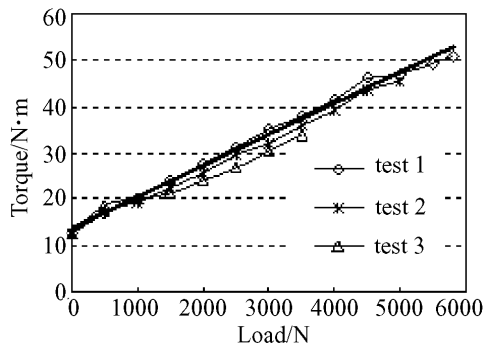


图 3 C/SiC 复合材料在恒转速下的摩擦扭矩 - 载荷关系

Fig. 3 Relation of friction torque and load of C/SiC composites under constant rotation velocity

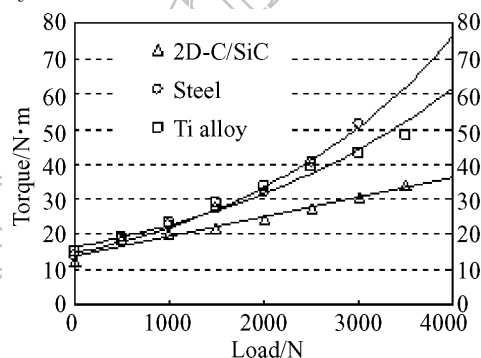


图 4 C/SiC 复合材料、钛合金以及钢在恒转速下的摩擦扭矩 - 载荷关系对比

Fig. 4 Comparison of torque-load relation of C/SiC composite, Ti alloy and steel under constant rotation velocity

分别从 0 加载到 3500、5000、5800N 三次试验中, 载荷与摩擦扭矩都近似线性关系; 当载荷达到 5800N 时, 摩擦扭矩达到 50N·m, 此时试样仍然转动良好, 没有发生抱死现象, 转动过程中没有发现有磨屑掉落, 没有噪音. 由于轴的径向载荷增大等效于接触表面的法向载荷增大, 表面接触压强也增大, 因此摩擦表面的接触压强与摩擦扭矩也成线性关系. 假设引起摩擦扭矩的各种形式的力统称为摩擦阻力. 那么力矩的增大表明摩擦阻力增大. 载荷增大使得接触压强增大, 摩擦加剧、摩擦阻力增大、摩擦扭矩也就增大. 载荷与摩擦扭矩的线性关系表明, 在传动过程中 C/SiC 复合材料之间的摩擦系数恒定 (摩擦力除以载荷), 摩擦性能稳定. 测量摩擦以后静环与转动轴的尺寸变化, 发现静环几乎没有变形, 轴的磨损量也很小 (见后面磨损分析). 说明恒定转速下, C/SiC 复合材料之间的摩擦扭矩增大主要源于载荷引起的接触压强增大, 材料变形对摩擦扭矩的贡献很小.

3.3 C/SiC复合材料、Ti合金、钢三种材料在传动过程的摩擦行为对比

静止环为 C/SiC 复合材料, 转动轴分别为相同尺寸的 C/SiC 复合材料、Ti 合金、钢, 这样构成了 C/SiC 与 C/SiC、C/SiC 与 Ti 合金、以及 C/SiC 与钢三种摩擦副. 在恒定转速 32r/min 条件下, 分析载荷对三种摩擦副材料摩擦性能的影响.

图 4 显示了恒定转速下三种材料的摩擦扭矩与载荷关系图. 结果发现摩擦扭矩都随载荷增大而增大, 说明摩擦阻力也都随载荷增大而增大. 但是, 对于 Ti 合金和钢两个新的摩擦副, 其摩擦扭矩与载荷不成线性关系, 并且摩擦扭矩比自对偶 C/SiC 复合材料摩擦副的扭矩增长更快. 当载荷达到 3000N 时, C/SiC、Ti 合金、钢的摩擦扭矩分别为 30、44 和 51N·m. 并且在试验过程中 Ti 合金、钢分别与 C/SiC 对磨时有较大的摩擦噪音以及大量磨屑掉落. 可以看出, C/SiC 复合材料的摩擦扭矩与载荷呈线性关系, 而钢与 Ti 合金的扭矩与载荷呈非线性关系. 根据摩擦系数与载荷、摩擦力的关系, 可以得知在相同的传动过程中, 自对偶 C/SiC 复合材料之间的摩擦系数恒定, 而 Ti 合金、钢分别与 C/SiC 对偶时摩擦系数不稳定并且有增大趋势. 因此, 在相同载荷下以低转速进行传动时, 自对偶 C/SiC 复合材料之间的摩擦阻力小于 Ti 合金与 C/SiC 之间以及钢与 C/SiC 之间的摩擦阻力. 摩擦扭矩与载荷的线性关系说明对偶 C/SiC 复合材料之间的摩擦系数稳定且不依赖于载荷而变化. 这主要与三种摩擦副在摩擦过程的材料变形有关. 摩擦过程中摩擦表面温度会升高, 而 Ti 合金 $((8\sim11)\times10^{-6}/\text{K})$ 与钢的热膨胀系数 $((10\sim18)\times10^{-6}/\text{K})$ 大于 C/SiC 复合材料 $((2\sim5)\times10^{-6}/\text{K})$, 这样在相同载荷下摩擦时 Ti 合金与钢由于接触表面局部温度升高而引起的变形会较大, 容易使接触表面的材料磨损加剧. 测量摩擦以后的试样尺寸, 发现 Ti 合金轴与钢轴的磨损量较大, 对 C/SiC 复合材料静环造成的磨损较严重、变形也严重.

3.4 转速对 C/SiC 复合材料传动过程中摩擦行为的影响

C/SiC 复合材料静止环与 C/SiC 复合材料转动轴构成一对摩擦副, 通过改变转速测试摩擦扭矩的变化, 分析在恒定载荷下转速对 C/SiC 与 C/SiC 复合材料之间摩擦性能的影响. 如图 5 所示, 当拉伸载荷为 0, 转速从 32r/min 以 16r/min 间隔以阶梯状增大到 80r/min 时, 发现摩擦扭矩曲线是一条平稳直线, 力矩大约 15N·m. 说明在低转速条件下, 转速的改变对 C/SiC 复合材料的摩擦扭矩几乎没

有影响; 转速对摩擦阻力的贡献不大, 主要是因为转速增大时接触表面虽然会有温度上升, 但 C/SiC 复合材料的热膨胀系数较小, 材料变形小, 对表面实际接触压强的影响不大, 因此摩擦扭矩几乎没有变化.

如图 6 所示, 当拉伸载荷增大时, 摩擦扭矩和载荷几乎以相同的速度增长, 当载荷达到 1000N 时, 力矩约为 25N·m. 在 1000N 恒定载荷下, 继续改变转速, 发现摩擦扭矩仍然保持平稳, 说明在低的转速条件下 C/SiC 复合材料的摩擦扭矩对转速不敏感. 在恒定载荷条件下, C/SiC 复合材料保持恒定的摩擦扭矩, 表明摩擦系数保持恒定. 因此, 可以得出 C/SiC 复合材料在传动过程中显示出稳定的摩擦性能, 其摩擦系数既不随载荷增大而改变, 也不随转速的变化而改变.

3.5 C/SiC 复合材料在传动过程中的磨损与表面形貌

由于摩擦副之间摩擦行为的差异, 材料的磨损量也不同. 对比分析 C/SiC 与 C/SiC 以及 C/SiC 与 Ti 合金两种摩擦副在相同试验条件下的磨损量. 试验条件为恒定转速 32r/min, 载荷从 0 增加到 3000N, 摩擦副的运行时间为 300s. 试验结束后

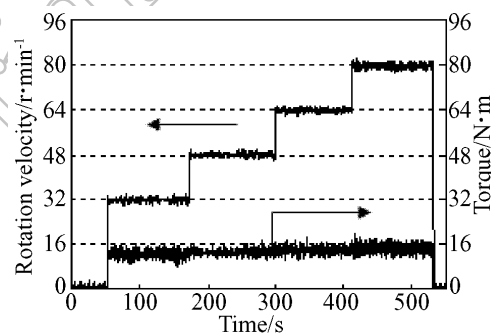


图 5 C/SiC 复合材料在零载荷下的摩擦扭矩 - 转速关系

Fig. 5 Relation of friction torque and load of C/SiC composites under zero loads

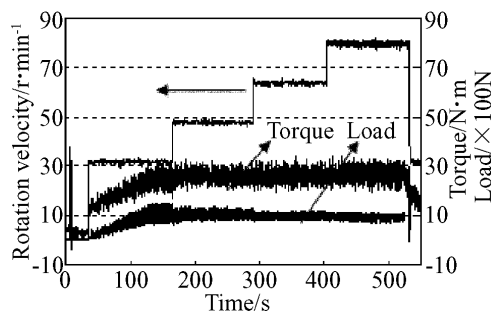


图 6 C/SiC 复合材料在恒定载荷 1kN 时的摩擦扭矩 - 转速关系

Fig. 6 Relation of friction torque and load of C/SiC composites under the load of 1kN

表 2 不同摩擦副之间 C/SiC 与 Ti 合金的磨损量
Table 2 Wear of C/SiC composites and Ti alloy for different sliding couples

	Sliding couples	Direction	Wear/mm
1	C/SiC stationary ring	X-	0.01
		Z-	0.03
	C/SiC rotating sample	Max-	0.02
		Min-	0.01
2	C/SiC stationary ring	X-	0.1
		Z-	0.3
	Ti alloy rotating sample	Max-	0.07
		Min-	0.06

两种摩擦副静环与转动轴的总磨损量见表 2 中所示. 其中 Z 代表加载方向, X 代表与 Z 垂直的径向方向, Y 表示轴的长度方向, 见图 1 标注的方向所示. Max- 与 Min- 分别代表轴在径向方向的最大与最小磨损量. 结果发现, C/SiC 与 C/SiC 构成摩擦副时, 静环与轴的磨损量都明显小于 C/SiC 与 Ti 合金摩擦副. 另外 C/SiC 转动轴对 C/SiC 静环造成的材料变形量 $<0.02\text{mm}$, 约是 Ti 合金造成静环变形量的 1/10; 而 Ti 合金轴对 C/SiC 静环不但造成严重磨损, 更造成严重变形, 使静环在 Z 方向被拉长横截面接近椭圆形貌.

图 7 显示了 C/SiC 静环分别与 C/SiC、Ti 合金转动轴配合时的径向磨损率. 为了考察环与轴沿长度方向上的磨损均匀性, 如图 1 中标注 a、b、c 所示, 沿长度方向取三个部位进行磨损率测量. 该图显示了转动轴每转一圈时对静环 a、b、c 三个部位在高载荷下造成的平均磨损量. 图 7 和 8 中所标注的磨损率 $\mu\text{m/r}$ 是指每转的材料厚度磨损率, 即总磨损量除以 $160\text{r}(5\text{min} \times 32\text{r/min} = 160\text{r})$. 可以看出, C/SiC 与 C/SiC 摩擦副三个部位的磨损率远远小于 (约 1/10~1/20) C/SiC 环与 Ti 合金轴摩擦副; 同时 C/SiC 静环在 Z 和 X 两个方向的磨损率差值很小, 而与 Ti 合金配合时静环 Z 方向磨损率远远大于 X 方向 (最大相差 $1\mu\text{m/r}$).

图 8 显示了 C/SiC 轴和 Ti 合金轴平均转动一圈的磨损率. Ti 合金轴的磨损率明显大于 C/SiC 轴, 轴的最大直径与最小直径的差值很小 ($<0.1\mu\text{m/r}$). 在摩擦过程中, 由于径向载荷的作用静止环在 Z 方向不断被磨损, 而轴在转动过程中其整个圆周方向上不断被削平磨损并慢慢变细, 因此轴的最大与最小直径差值非常小. 由图 7 和图 8 可以得出, 在恒定转速下, 载荷增大时 C/SiC 与 C/SiC 摩

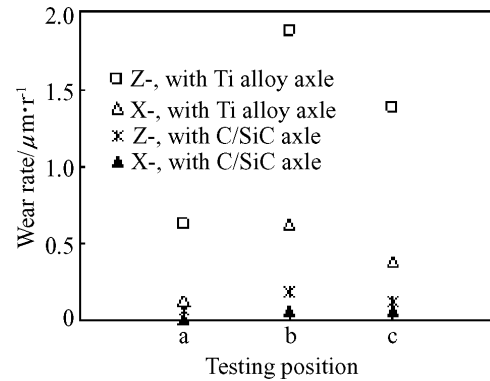


图 7 C/SiC 复合材料静环分别与 C/SiC 复合材料和 Ti 合金轴摩擦时的磨损率

Fig. 7 Wear rate of C/SiC composite stationary ring against C/SiC composite axle and Ti alloy axle respectively

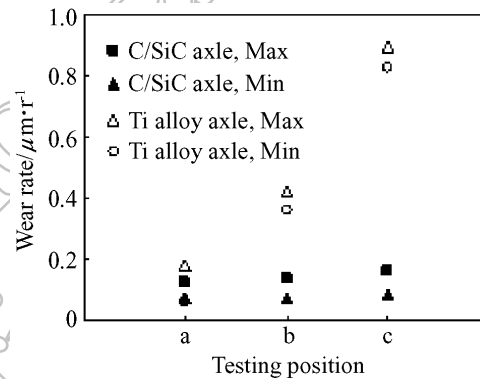


图 8 C/SiC 复合材料轴与 Ti 合金轴的磨损率

Fig. 8 Wear rate of C/SiC composite axle and Ti alloy axle

擦副的平均磨损率小, 静环 $\sim 0.2\mu\text{m/r}$, 轴 $\sim 0.1\mu\text{m/r}$; 而 C/SiC 环与 Ti 合金轴配合时会发生剧烈磨损, 静环最大磨损率达 $1.9\mu\text{m/r}$, 轴最大磨损率达 $0.9\mu\text{m/r}$. 因此, C/SiC 复合材料以其较低的磨损率特别是在高载荷下的极小变形验证了极好的耐磨特性以及承载能力. 在相同试验条件下 C/SiC 复合材料的磨损率约 $0.1 \sim 0.2\mu\text{m/r}$, 只有 Ti 合金磨损率的 1/10~1/20, 同时高载荷下的材料变形 $<0.02\text{mm}$, 约是 Ti 合金的 1/10.

以上分析进一步解释了前面所述不同材料的载荷与摩擦扭矩的关系. C/SiC 复合材料配合时摩擦扭矩的增大主要源于载荷增大引起的接触压强变化, 材料变形的贡献很小. 而 Ti 合金与 C/SiC 配合时摩擦扭矩的非线性快速增长, 源于摩擦阻力既有接触压强的贡献, 又有材料变形的贡献.

磨损表面的形貌主要取决于摩擦副接触表面上材料的摩擦作用与损伤机理. 采用扫描电子显微镜观察了 C/SiC 复合材料转动轴的磨损表面形貌.

如图 9 所示, 试样表面有显著的犁沟划痕沿滑动方向有规律地间隔分布, 间距约 $300\mu\text{m}$, 这主要由材料接触表面的凸峰在滑动过程中相互运动产生. 而犁沟对表面造成的损伤程度主要取决于摩擦表面的硬度以及表面上所施的载荷或者接触压强大小. 在这种高载荷、低转速的摩擦试验后, 摩擦表面没有显著热裂纹. 在摩擦过程中接触表面之间局部温度过高对裂纹的形成起主要作用, 特别是对有涂层的表面. 很多情况下基体与涂层的热膨胀系数不匹配是裂纹形成的主要原因. 发现 C/SiC 复合材料表面没有大尺寸的磨粒, 以小尺寸磨粒均匀分布于摩擦表面上, 另外表面没有发生粘着现象. 说明在低转速下, 即使载荷升高没有引起 C/SiC 复合材料表面显著温升, 也没有造成因热膨胀系数不匹配产生的裂纹; 摩擦作用以接触表面的相互磨合为主, 低转速下磨粒磨损是其主要磨损形式, 尚未过渡到粘着磨损阶段.

4 结论

1. 用化学气相渗透 (CVI) 的方法制备出力学性

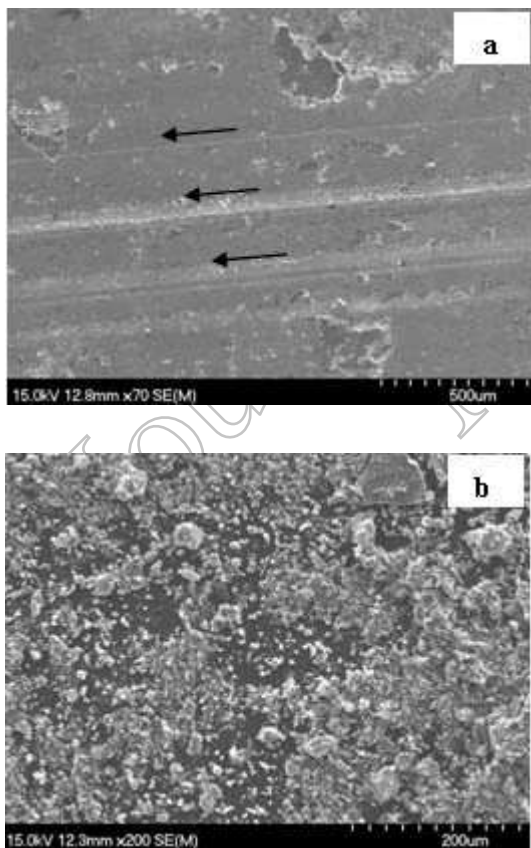


图 9 C/SiC 复合材料的摩擦表面与磨屑形貌
Fig. 9 SEM images of worn surfaces and wear debris of C/SiC composites

能与摩擦性能优良的二维 C/SiC 复合材料. 其密度约 $2.03\text{g}/\text{cm}^3$, 气孔率约 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. C/SiC 复合材料摩擦性能可通过摩擦扭矩进行表征, 可直接反映材料在传动过程中的摩擦行为. C/SiC 复合材料在传动过程中表现出稳定的摩擦性能. 其摩擦扭矩与载荷的线性关系表明在试验条件下其摩擦系数恒定, 当载荷达到 5800N 时, 所产生的摩擦扭矩约 $50\text{N}\cdot\text{m}$.

3. C/SiC 复合材料在传动过程中摩擦扭矩对转速的变化不敏感. 恒定载荷下其恒定的摩擦扭矩表明在试验条件下摩擦系数恒定. 当载荷保持 1kN 转速增大到 $80\text{r}/\text{min}$ 时, 摩擦扭矩保持在约 $25\text{N}\cdot\text{m}$.

4. C/SiC 复合材料以其较低的摩擦扭矩、低的磨损率以及高载荷下较小的变形验证了良好的耐磨特性及承载能力. 恒定转速加载到 3kN 下运行 300s 时其磨损率与材料变形只有 Ti 合金的 $1/10\sim 1/20$.

5. 低转速下 C/SiC 复合材料磨损机理以磨粒磨损为主, 磨损表面有显著的犁沟划痕沿滑动方向有规律地间隔分布, 高载荷没有引起表面热裂纹.

参考文献

- [1] Wulz H G, Trabandt U. AIAA-97-2485, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1997.
- [2] Kladtke R, Puttmann N, Graf E D. AIAA 1999-99-4936, The American institute of aeronautics and astronautics, 1999.
- [3] Hald H, Weihs H. AIAA 2003-2696, International air and space symposium and exposition, 2003.
- [4] Muhlatzer A, Pfeiffer H. *Ceram. Eng. and Sci. Pro.*, ABI/INFORM Trade & Industry, 2002, **23** (3): 331-338.
- [5] Ortel M, Weihs H, Fischer I, et al. *Ceram. Eng. Sci. Pro.*, ABI/INFORM Trade & Industry, 2003, **24** (4): 281-287.
- [6] Robert L. Fusaro, 2001 Annual meeting, Society of tribologists and lubrication engineers, NASA/TM —2001-210806, Orlando, Florida, 2001, May 20-24.
- [7] Krenkel W, Heidenreich B, Renz R. *Adv. Eng. Mat.*, 2002, **4**: 427-436.
- [8] Pak Z S. *Key Eng. Mat.*, 1999, **164-165**: 820-825.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Vaidyaraman S, Purdy M, Walker T, et al. *Key Eng. Mat.*, 1999, **164-165**: 802-808.
- [12] Paris J Y, Vincent L, Denape J. *Com. Sci. Tech.*, 2001, **61** (3): 417-423.