

Si₃N₄耐高温全陶瓷向心关节轴承磨损性能研究

李颂华^{1,2} 薛宝圆¹ 左闯^{1*}

1. 沈阳建筑大学机械工程学院, 沈阳, 110168

2. 高档石材数控加工装备与技术国家地方联合工程实验室, 沈阳, 110168

摘要:针对高温工况下Si₃N₄耐高温全陶瓷向心关节轴承的接触特性和磨损性能进行研究。基于热力耦合有限元仿真方式对关节轴承内外圈温度场进行分析,利用自研的高温关节轴承试验机开展磨损试验,通过扫描电子显微镜和能谱仪对内外圈不同接触区域的磨损表面形貌和成分进行分析,探明全陶瓷关节轴承的磨损机理。结果表明:全陶瓷关节轴承在400℃高温下,磨损过程主要分为磨损量显著增大的磨合期、磨损量缓慢增大的稳定磨损期;磨损区域主要分为以黏着磨损和氧化磨损为主的核心承压区、以磨粒磨损为主的非核心承压区。该关节轴承在200 N径向载荷、2 Hz摆动频率、±25°摆动角度、25 000次摆动条件下磨损量为108 μm,耐磨性能良好,运行状态平稳。

关键词: Si₃N₄陶瓷; 向心关节轴承; 高温环境; 热力耦合; 磨损机理

中图分类号: TH117.1

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.09.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study on Wear Performance of Si₃N₄ High Temperature Resistant All Ceramic Spherical Plain Bearings

LI Songhua^{1,2} XUE Baoyuan¹ ZUO Chuang^{1*}

1. School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, 110168

2. High-grade Stone CNC Machining Equipment and Technology National Local Joint Engineering Laboratory, Shenyang, 110168

Abstract: The contact characteristics and wear properties of Si₃N₄ high temperature resistant all ceramic radial spherical plain bearings were studied under high temperature conditions. Based on thermal-mechanics coupling finite element simulation method, the temperature fields of the inner and outer rings of the spherical plain bearings were analyzed. The wear tests were carried out by using self-developed high-temperature spherical plain bearing test machine. The wear surface morphology and composition of different contact areas of inner and outer rings were analyzed by scanning electron microscope and energy dispersive spectrometer, and the wear mechanism of all ceramic spherical plain bearings was proved. Results show that the wear process of all ceramic spherical plain bearings at 400 °C are mainly divided into a running-in period with a significant increase in wear and a stable wear period with a slow increase in wear. The wear areas are mainly divided into core bearing areas dominated by adhesive wear and oxidation wear, and non-core bearing areas dominated by abrasive wear. The wear loss of the spherical plain bearings is 108 μm under the condition of 200 N radial load, 2 Hz swing frequency and ±25° swing angle, 25 000 swing times. The wear resistance is good and the running state is stable.

Key words: Si₃N₄ ceramics; spherical plain bearing; high temperature environment; thermo-mechanics coupling; wear mechanism

0 引言

关节轴承通常是由带内球面的外圈和带外球面的内圈构成的球面滑动轴承^[1],此类轴承在航空航天、高温机械、生物工程中得到了广泛使用,具备承受高负荷、实现持久耐用性、旋转便捷、维

护需求低、结构紧凑和便于安装与拆卸的特性。在运作过程中,关节轴承具有无需维修和添加润滑油的特点^[2]。

耐高温关节轴承主要以无衬垫技术方案为主,可分为Si₃N₄全陶瓷关节轴承、铜嵌石墨高温关节轴承、开口型金属关节轴承^[3-5]。随着航空发动机的压气机增压比加大,其可调静子叶片系统将在超过400℃的环境下工作。在这种温度环境下关节轴承中的聚四氟乙烯(PTFE)衬垫难以正

收稿日期:2024-08-13

基金项目:国家自然科学基金(U23A20631);辽宁省航发材料摩擦学重点实验室开放基金(LKLAMTF202306)

常工作,导致机构阻滞力增大,静子叶片角度偏差变大,严重影响压气机工作裕度及工作可靠性^[6-8]。在高温工况下,关节轴承的润滑效果受限,材料性能易导致摩擦损伤,影响其使用寿命。在此背景下,耐高温且耐磨损的 Si_3N_4 陶瓷材料被认为是极端工况下关节轴承的理想选择,具备广阔的应用潜力^[9]。

因此,本文提出了 Si_3N_4 耐高温全陶瓷关节轴承的设计方案。目前,国内外研究者普遍采用销-盘、环-环等类型的专用摩擦试验设备来研究 Si_3N_4 材料的摩擦性能。但是,这种平面点或面接触形式与实际关节轴承内外圈的弧面接触形式仍存在较大的差异,对由 Si_3N_4 陶瓷制成的关节轴承在磨损特性及其机理方面的研究相对较少。

笔者采用销-盘摩擦试验技术,对不同环境温度下,经热等静压工艺成形的 Si_3N_4 陶瓷在多种表面状况下的摩擦学性能及磨损机制进行研究,发现在保持一致表面质量的 Si_3N_4 摩擦副中,随着环境温度的提高,摩擦因数呈增大趋势;磨损量则随着试验温度的升高呈先增后减的趋势。此外,相较于表面质量,温度变化对磨损量的影响更为显著^[10]。刘文进等^[11]研究了高温环境下 Si_3N_4 陶瓷与C/SiC陶瓷或GH214合金之间的平面摩擦磨损特性及磨损机理,发现在 Si_3N_4 陶瓷与合金研磨中,温度升高导致摩擦因数增大,陶瓷表面形成金属氧化物层,磨损形式主要是黏着磨损和氧化磨损。氧化磨损形成的氧化膜对陶瓷有保护和润滑作用,可以降低磨损,延长使用寿命。王娟平等^[12]对EM42高速工具钢与 Si_3N_4 陶瓷材料在干摩擦环境下的摩擦磨损特性进行了测试。试验发现,在干摩擦条件下,随着摩擦速度的提高,EM42高速钢和 Si_3N_4 陶瓷的摩擦因数和磨损量均下降,摩擦表面从犁沟和硬质相脱落变为硬质相磨粒挤压和疲劳脱落,最终形成润滑膜。任靖日等^[13]利用球-盘摩擦试验机研究了 Si_3N_4 在常温至1000℃间的摩擦磨损特性,结果表明: Si_3N_4 摩擦因数随负载增大而降低,受温度影响显著。常温下磨损率随滑动距离延长而减小,磨损机制在低温以脆性断裂为主,在高温则受氧化作用影响。KRBATA等^[14]研究了90MnCrV8工具钢与 Si_3N_4 陶瓷球接触时的摩擦性能,结果显示,磨损速率的加剧会导致材料表面性能退化,表面粗糙度增大,进而引起材料磨损率增大。

常浩捷等^[15]构建了GE30C型自润滑关节轴承在承受径向载荷时的倾斜与旋转摆动有限元分

析模型。通过对温度场的分析,观察到织物衬垫中心区域温度最高,且温度沿着两侧逐渐递减,磨损最严重的区域集中在中心带部分。戴雨静等^[16]构建了金属关节轴承模型,分析其在3种工作状态下的静态力学和热力耦合特性。结果显示,极限载荷下轴承端部出现应力集中,复合载荷下应力更高。研究指出,端面沟槽设计影响应力集中,极限载荷产生更多摩擦热,复合载荷温升超过纯径向载荷,倾斜位置温升更明显。

综上所述, Si_3N_4 陶瓷高温工况下耐磨性能良好,可为耐高温关节轴承提供新的材料选择,但是目前对 Si_3N_4 全陶瓷关节轴承磨损性能研究较少。为了准确评价关节轴承在摆动工作状态下的磨损性能,本文运用热力耦合的有限元分析方法,探讨了关节轴承内外圈温度场的分布特性,同时利用自主研发的高温关节轴承摩擦磨损试验机对 Si_3N_4 全陶瓷关节轴承进行了径向载荷作用下内圈往复连续摆动的摩擦磨损性能测试。将关节轴承因磨损导致的径向磨损量作为评估关节轴承宏观摩擦性能的依据,同时,利用SEM探究关节轴承磨损的微观机制,为后续该类关节轴承的研发提供依据。

1 热力耦合有限元仿真

1.1 关节轴承结构和参数

本文试验样品是GE8C型 Si_3N_4 全陶瓷向心关节轴承。该关节轴承是非标向心关节轴承,图1为该关节轴承的结构及运动加载示意图,几何参数见表1。图1中轴承外圈保持固定,而内圈则沿轴线连续往复运动,并能在运动过程中承担力 F 的加载。内外圈均采用热等静压制备的 Si_3N_4 陶瓷材料,材料性能如表2所示。

1.2 有限元仿真模型的建立

为了简化有限元模型的复杂度,分析时提出了以下假设:① Si_3N_4 全陶瓷关节轴承内外圈接触面上的摩擦因数 μ 均匀且恒定为0.6^[10];②热膨胀系数 α 、热导率 λ 和比热容 c 为常数,不随温度波动改变;③忽略材料的磨损效应,并假定摩擦和挤压产生的能量完全转化为热能;④忽略对流换热和热辐射对模型的影响。

热力耦合分析在ANSYS Workbench的瞬态动力学模块内执行,为方便施加载荷,在仿真模型中添加一个加载板零件。依据表2的参数,配置内外圈的材料属性,并将加载板材料定义为碳素钢。

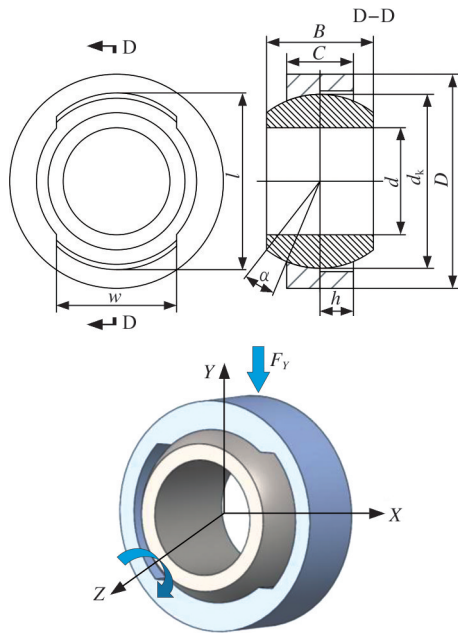


图1 Si₃N₄全陶瓷关节轴承结构及运动加载示意图
Fig.1 Si₃N₄ ceramic spherical plain bearing structure and motion loading diagram

表1 Si₃N₄全陶瓷关节轴承主要结构尺寸参数

Tab.1 Main structure size parameters of Si₃N₄ full ceramic plain bearings mm

参数	外圈外径 <i>D</i>	内圈内径 <i>d</i>	内圈宽度 <i>B</i>	外圈宽度 <i>C</i>	内圈球径 <i>d_k</i>	开口宽度 <i>w</i>	开口长度 <i>l</i>	开口深度 <i>h</i>
数值	16	8	8	5	13	9.4	13.6	2.7

表2 陶瓷材料的物理性质

Tab.2 Physical properties of ceramic materials

参数	数值
密度/(g·cm ⁻³)	3.24
弹性模量/GPa	320
泊松比	0.26
硬度/HRC	94
断裂韧性/(MPa·m ^{-1/2})	7.0
抗压强度/MPa	420
热膨胀系数/(10 ⁻⁶ ·K ⁻¹)	3.2

内外圈模型离散化处理采用六面体网格划分方法。加载板与外圈外表面设为绑定接触，内圈外表面与外圈内表面之间设为摩擦接触，此时摩擦因数被设定为0.6。在解决接触问题时，采用了增强的Lagrange算法来确保求解的准确性。

如图2所示，在加载板顶端施加200 N的径向载荷。对加载板顶面的移动自由度进行限制，使其只在y轴垂直方向上移动，同时约束内圈内表面自由度，使其仅能围绕内表面中心x轴旋转。

在往复摆动过程中，自润滑关节轴承的内外圈相对滑动，根据关节轴承的摆动频率内圈摆动

时长设定为0.125 s，摆动角度为25°；步长根据子步的数量来调整，初始、最小和最大步长均设置为150。在求解过程中，始终开启大变形选项，并将环境温度设定为400 °C。

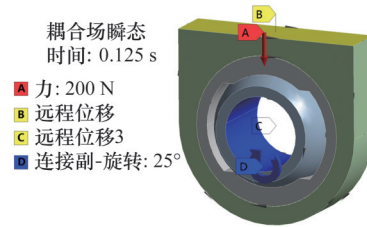


图2 载荷及边界条件

Fig.2 Load and boundary conditions

1.3 结果分析

轴承的仿真完成后，温度分布如图3所示，可见最高温度位于内外圈接触面的中心区域。这是由于接触面中心区域承受的接触压力更大，产生的摩擦热也相对更多，因此温度由接触面中心向边缘逐渐降低。

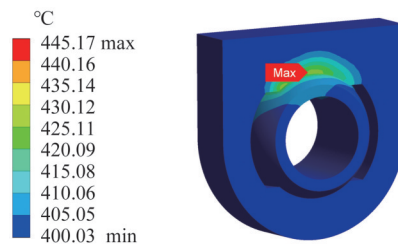


图3 轴承的温度云图

Fig.3 Temperature cloud map of bearing

图4所示为轴承内圈的温度分布情况，图中可见接触面中心附近区域的温度相对较高，最高温度达到445 °C。图5所示为外圈的温度分布情况，最高温度区域与内圈一致，同样位于接触面中心。此外，由于外圈开口原因，在外圈内表面开口边缘处温度值较高，最高温度值为445.17°C，与接触区域中心值接近，其余区域温度则相对较低。另外，由于内圈体积较大，且内圈的旋转运动有助于热量的散发，因此在接触面同一径向距离上，外圈的温度普遍高于内圈。

基于前面建立的有限元模型以及边界条件配

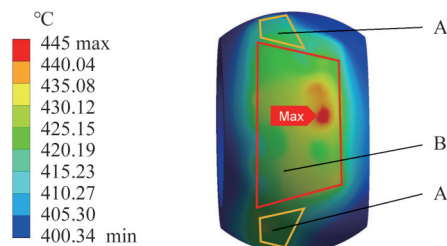


图4 内圈的温度云图

Fig.4 Temperature cloud map of the inner ring

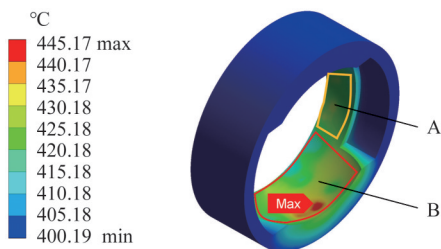


图5 外圈的温度云图

Fig.5 Temperature cloud map of the outer ring

置, Si₃N₄全陶瓷关节轴承内外圈的 von Mises 等效应力分布如图6、图7所示。可见内圈最大的等效应力位于接触面的中心位置, 达到 29.051 MPa; 而外圈部分的最大 von Mises 等效应力出现在接近内侧表面边缘, 大约在边缘靠内 1~1.5 mm 的位置, 其应力值为 53.864 MPa。

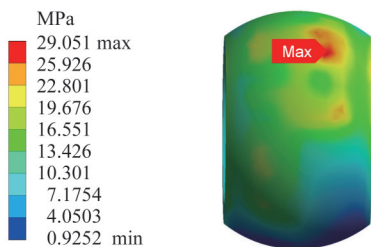


图6 内圈的等效应力云图

Fig.6 Equivalent stress cloud map of the inner ring

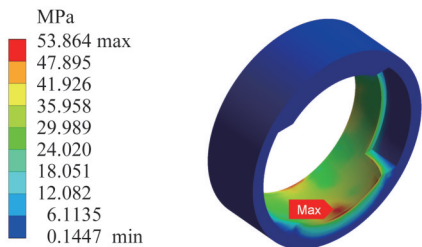


图7 外圈的等效应力云图

Fig.7 Equivalent stress cloud map of the outer ring

2 磨损试验及结果

2.1 试验设备

试验设备为自主研发的一款高温关节轴承摩擦磨损试验机, 见图8。本试验机具备高温环境模拟系统, 采用管式加热炉作为加热装置, 可将试验温度升至 400 °C 高温, 模拟关节轴承的高温工作环境; 通过调压阀和角度调节螺杆分别控制旋转气缸的摆动频率和摆动角度; 通过控制直线气缸进气压力大小对关节轴承外圈施加不同的径向负载。测量装置将采用自采式千分表并配合采集软件实时采集试验过程中因磨损产生的径向位移量, 采用动态扭矩传感器(型号 JN-DN-20)和扭矩采集软件实时记录轴承的摩擦扭矩。摩擦因数为

$$\mu = 2000 \frac{T}{F_N d_k}$$

式中: T 为动态扭矩传感器测得摩擦扭矩, $N \cdot m$; F_N 为加载机构施加的径向载荷, N ; d_k 为关节轴承的球径, mm 。

选用 S-4800 扫描电子显微镜对 Si₃N₄ 全陶瓷关节轴承内外圈磨损前后的微观形貌进行了对比分析, 探讨内外圈在不同接触位置的磨损形貌与磨损机理。

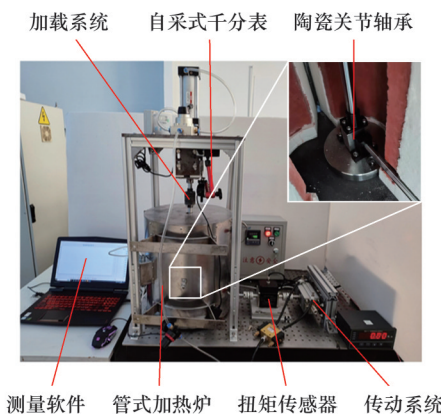


图8 高温关节轴承试验机

Fig.8 High temperature plain bearing testing machine

2.2 试验方案

根据 JB/T 8565—2010 标准并结合该非标关节轴承在实际应用中的工况, 制定以下摩擦学特性测试方案。首先将内圈与试验轴固定, 与加载夹具相连后置于管式加热炉内, 在加热炉外部有保温层以确保其他试验构件不受高温的影响; 对关节轴承施加初始载荷并保持 15 min 的静压状态。此环节的主要目的是消除 Si₃N₄ 与支撑轴热变形对磨损量测量的影响。在温度上升至 400 °C 后, 为确保关节轴承能够完全达到预定的试验温度, 必须将管式加热炉的温度调至指定值, 并维持该温度 2 h 不变^[6-8]。本研究旨在探索特定工况下的轴承磨损特性, 因此依据表 3 设定了相应的试验工况。考虑到试验时间较长、传感器采集数据量大, 设置软件数据采集间隔为 6 min。

表3 高温环境下 GE8C 轴承磨损试验参数

Tab.3 GE8C bearing wear test parameters under high temperature environment

参数	数值	参数	数值
径向载荷/N	200	摆角/(°)	±25
环境温度/°C	400	试件数量	1
摆动频率/Hz	2	摆动次数	25 000

2.3 试验结果与分析

2.3.1 关节轴承磨损过程分析

图9所示为轴承摩擦因数变化, 图10所示为轴承径向磨损位移量变化。由图9、图10可以看

出,在高频轻载试验工况下,关节轴承开始时处于磨合磨损期,磨损位移量在前2500次摆动过程中,磨损过程极不稳定,磨损量迅速增大,摩擦因数快速增大到0.585,磨损过程极不稳定。在这个阶段, Si₃N₄表面的微观凸起被磨去,使得实际接触面积持续增大,从而引起表面应变硬化。这会导致磨屑堆积,形成氧化膜,进而降低磨损速度。在摆动次数达到2500次之后,自润滑膜开始形成,导致磨损率降低,磨损曲线变得更加平稳,摩擦因数稳定在0.6左右上下波动。这一阶段被称为稳定磨损期,在这个阶段摩擦因数会在一定范围内波动,磨损位移量总体呈上升趋势。

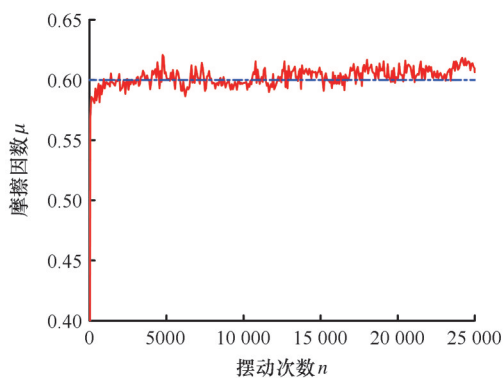


图9 轴承摩擦因数变化

Fig.9 Variation of bearing friction coefficient

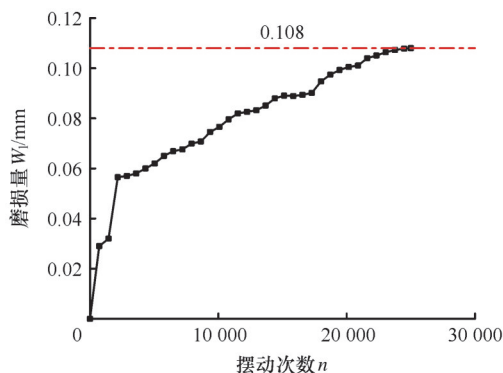


图10 轴承径向磨损位移量变化

Fig.10 Change of radial wear displacement of bearing

综上所述,在试验磨损25000次过程中, Si₃N₄陶瓷轴承的磨损过程可划分为两个主要阶段。初始阶段为干摩擦磨损期,在此期间表面微观凸起和凹陷处发生刮擦与穿透,导致磨损过程波动较大,摩擦学特性参数急剧增大,随后进入自润滑稳定磨损期,此时,摩擦学特性参数因自润滑膜的生成与剥离而呈波动变化。

2.3.2 磨损区域分析

如图11所示, Si₃N₄全陶瓷关节轴承分为非核心承压区域A、核心承压区域B,且内外圈主要磨损区域向开口一侧偏移,与热力耦合仿真模型

磨损区域划分基本一致。

B区域出现了显著的磨损,其摩擦宏观形貌上呈同心圆形状。在中心区域,由于受到较大的作用力,小圆周内的摩擦迹象变得模糊,并且可观察到多个小凹坑,这是由 Si₃N₄疲劳剥落形成的。根据赫兹接触理论,A区域的接触应力比B区域低,同样,A区域也形成了致密的润滑层,其摩擦痕迹表现为弧形的半圆形。

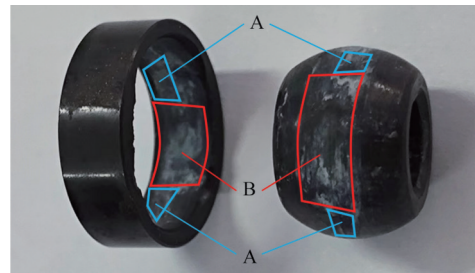


图11 向心关节轴承磨损区域

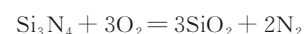
Fig.11 Wear area of spherical plain bearing

2.3.3 磨损机理研究

观察高温条件下磨损前后的A、B两个区域的SEM照片,如图12所示。图12d、图12e中,在非核心承压区域A,配副表面出现微粒(或凸起)以及磨痕。样品磨损表面出现磨粒磨损产生的沟槽(磨痕)和少量皱纹状或片状聚集的结构,磨损表面存在些许凹坑,并伴随有脆性剥落。摩擦产生的热量使得样品表面发生氧化反应,出现断续的附着层。磨损形态主要表现为磨粒磨损,并伴有轻微的黏着磨损和氧化磨损。图12g、图12h中,在核心承压区域B,表面的沟槽逐渐加深,片状附着层面积扩大,厚度增大,在内外圈表面出现了大量鳞片状黏着物。这些黏着物均具有明显的方向性,这是摩擦过程中 Si₃N₄材料的滑移和黏附所导致的黏着现象^[17]。因为B区域的接触应力大于A区域,接触表面间的摩擦力随着压力的增大而增大,这会导致表面的温度上升。在高温和摩擦热应力的作用下会使接触微凸体发生软化,在法向载荷和切向滑动力的共同作用下,微凸体会形成如图12g、图12h所示的方向性一致的鳞片状黏着物。该黏着物的生成说明发生黏着磨损。此区域主要表现为黏着磨损和氧化磨损。

高温摩擦试验后陶瓷样品的表面成分和标记部位的元素分布情况如图12f、图12i所示,不同测试条件下的Si、N、O等元素在磨损表面的分布含量与温度变化密切相关。

在高温氧化环境下 Si₃N₄相与 O₂反应生成了 SiO₂与 N₂:



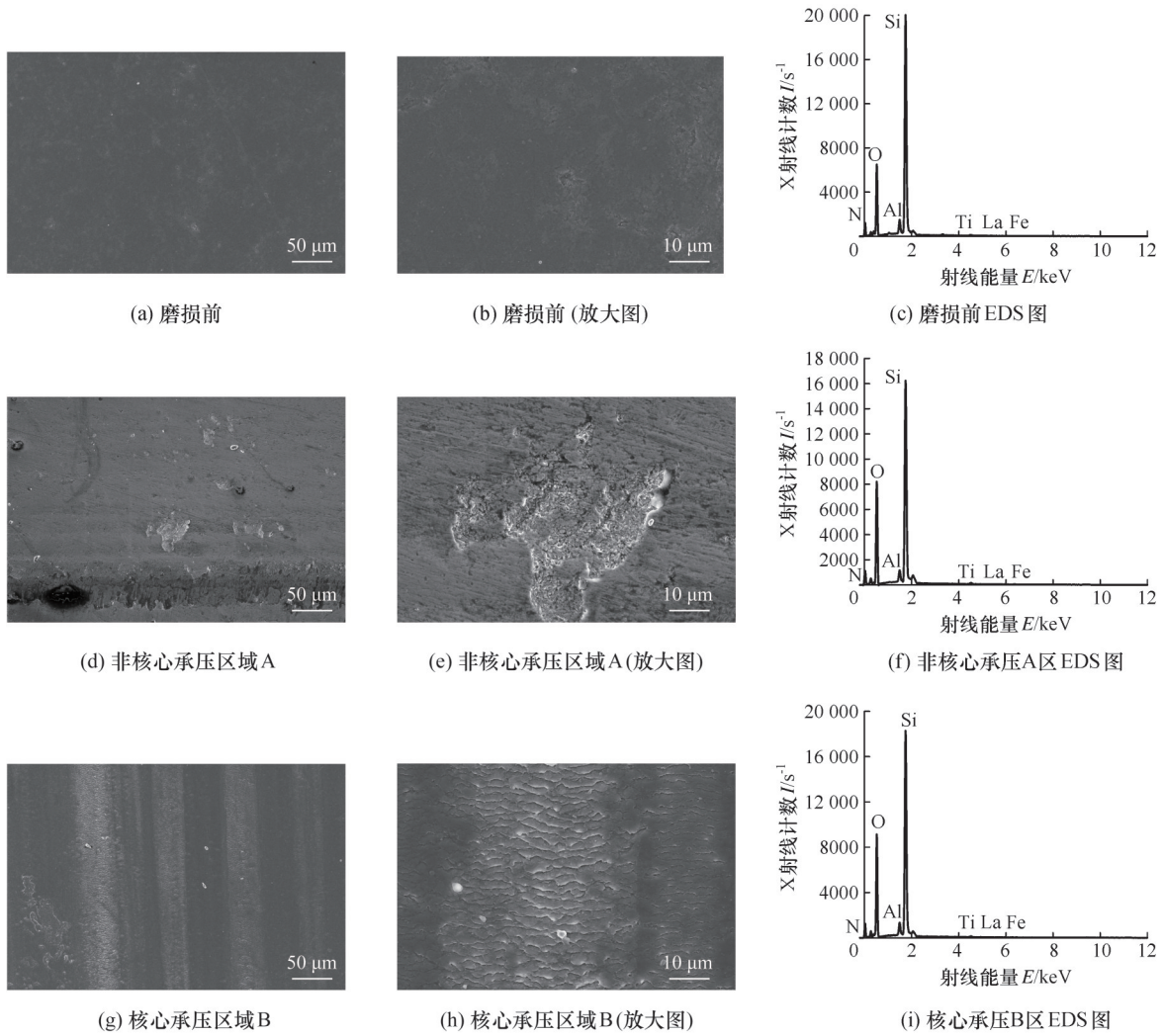


图 12 Si_3N_4 内圈磨损前后不同区域SEM图及EDS图

Fig. 12 SEM and EDS images of different regions before and after wear of Si_3N_4 inner ring

N元素以气体的形式挥发流失^[11],随着接触区域压力的增大,表面温度相应上升,样品表面的氧含量相应增大,进而发生氧化反应。这一反应在内外圈接触表面形成了一层氧化物(即附着层),这层陶瓷表面的 SiO_2 氧化物膜具有稳定性与连续性,并具备一定的润滑效果。

3 结论

1)在径向载荷 200 N、摆动角度 25° 、摆动频率 2 Hz 的高频轻载工况下, Si_3N_4 全陶瓷关节轴承在进行旋转摆动时,其内外圈中心区域的温度达到最高,向四周逐渐降低。磨损最为严重的区域集中在中心带。

2)对磨损后的关节轴承内外圈表面形成的不同微观形貌具体划分为非核心承压区和核心承压区两个区域,观察结果显示,在不同的接触部位,磨损机制存在差异,主要包括氧化磨损、磨粒磨损和黏着磨损。

3) Si_3N_4 全陶瓷关节轴承在倾斜摆动摩擦试验中展现出两个主要的磨损阶段。最初是干摩擦的磨合期,这一阶段的磨损过程极不平稳,伴随着摩擦学性能参数的急剧增大。随后进入自润滑机制下的稳定磨损期。在试验结束时,轴承的径向磨损量达到了 $108\ \mu\text{m}$ 。在 25 000 次摆动试验中,关节轴承表现出良好的运动性能,未出现卡死现象,同时轴承外圈未发生磨穿情况。这表明在此工况条件下该类型关节轴承满足使用标准。

参考文献:

[1] 周长春,李锐,谭德强,等.航空关节轴承摩擦学性能研究现状及进展[J].中国民航飞行学院学报,2020,31(6):5-10.
ZHOU Changchun, LI Rui, TAN Deqiang, et al. Research Status and Progress of Tribological Properties of Aviation Spherical Plain Bearings[J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China, 2020, 31(6):5-10.

- [2] 邱月平, 沈雪瑾. 关节轴承磨损性能试验研究进展[J]. 轴承, 2011(6):56-61.
QIU Yueping, SHEN Xuejin. Research Progress of Wear Performance Test for Spherical Plain Bearings [J]. Bearing, 2011(6):56-61.
- [3] 王平, 叶晓苇, 曹均. 高温核用自润滑关节轴承设计及分析[J]. 轴承, 2017(10):19-22.
WANG Ping, YE Xiaowei, CAO Jun. Design and Analysis of Self-lubricating Spherical Plain Bearings for Nucleus under High Temperature [J]. Bearing, 2017(10):19-22.
- [4] 张翔, 苏文文. K465超高温合金向心关节轴承的摩擦磨损性能研究[J]. 轴承, 2021(3):67-70.
ZHANG Xiang, SU Wenwen. Friction-wear Performance Test of Radial Spherical Plain Bearings Made of Ultra-high Temperature Alloy K465 [J]. Bearing, 2021(3):67-70.
- [5] SHIRATORI M, TAKEBAYASHI H, KANO K, et al. Characteristics of Ceramic Spherical Sliding Bearing for Severe Application[M]//Advanced Materials '93. Amsterdam:Elsevier, 1994:417-420.
- [6] 吴彼, 张振波, 李曙. 航空发动机材料摩擦学研究进展[J]. 摩擦学学报, 2023, 43(10):1099-1117.
WU Bi, ZHANG Zhenbo, LI Shu. Advances in Tribology of Aero-engine Materials [J]. Tribology, 2023, 43(10):1099-1117.
- [7] CHENG Shuai, MENG Xianghui, LI Rui, et al. Rough Surface Damping Contact Model and Its Space Mechanism Application[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2022, 214:106899.
- [8] WOLLMANN T, NITSCHKE S, KLAUKE T, et al. Investigating the Friction, Wear and Damage Behaviour of Plain Bearing Bushes of the Variable Stator Vane System [J]. Tribology International, 2022, 165:107280.
- [9] 孙泽, 陈辉, 肖光春, 等. 非钢制关节轴承制造材料研究进展[J]. 轴承, 2024(2):1-8.
SUN Ze, CHEN Hui, XIAO Guangchun, et al. Research Progress on Manufacturing Materials for Non-steel Spherical Plain Bearings [J]. Bearing, 2024(2):1-8.
- [10] LI Songhua, WEI Chao, WANG Yonghua, et al. Effects of High Ambient Temperature and Surface Quality on Tribological Properties of Si₃N₄[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2022, 31(10):8355-8364.
- [11] 刘文进, 周国相, 杨治华, 等. 高温下氮化硅陶瓷摩擦磨损性能的演变及机理研究[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(1):302-311.
LIU Wenjin, ZHOU Guoxiang, YANG Zhihua, et al. Evolution and Mechanism of Friction and Wear Properties of Silicon Nitride Ceramics at High Temperature [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2024, 43(1):302-311.
- [12] 王娟平, 李飞舟. EM42与Si₃N₄陶瓷干摩擦磨损性能的研究[J]. 热加工工艺, 2012, 41(14):13-15.
WANG Juanping, LI Feizhou. Study on Dry Friction and Wear Characteristics of EM42 Against Si₃N₄ Ceramic [J]. Hot Working Technology, 2012, 41(14):13-15.
- [13] 任靖日, 李花, 金石三. 高温下氮化硅的摩擦学性能研究[J]. 延边大学学报(自然科学版), 2003, 29(3):212-215.
REN Jingri, LI Hua, JIN Shisan. Friction and Wear Evaluation of Silicon Nitride on Elevated Temperature [J]. Journal of Yanbian University (Natural Science Edition), 2003, 29(3):212-215.
- [14] KRBATA M, ECKERT M, MAJERIK J, et al. Wear Behaviour of High Strength Tool Steel 90Mn-CrV8 in Contact with Si₃N₄[J]. Metals, 2020, 10(6):756.
- [15] 常浩捷, 陈锦江, 王泽民, 等. 自润滑关节轴承温度场的有限元分析[J]. 机床与液压, 2018, 46(21):164-168.
CHANG Haojie, CHEN Jinjiang, WANG Zemin, et al. The FEA about Temperature Field of Self-lubricating Spherical Plain Bearings [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2018, 46(21):164-168.
- [16] 戴雨静, 汪久根, 洪玉芳, 等. 起落架用金属关节轴承有限元分析[J]. 轴承, 2019(8):1-6.
DAI Yujing, WANG Jiugen, HONG Yufang, et al. Finite Element Analysis on Metal Spherical Plain Bearings for Landing Gear [J]. Bearing, 2019(8):1-6.
- [17] WANG Zhishuang, LI Songhua, SUN Jian, et al. Experimental Study on the Effect of Load and Rotation Speed on Dry Sliding of Silicon Nitride [J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2021, 73(5):809-816.

(编辑 王昱玥)

作者简介:李颂华,男,1977年生,教授、博士研究生导师。研究方向为高端陶瓷轴承与智能陶瓷电主轴。E-mail:rick_li2000@163.com。左闯(通信作者),男,1991年生,博士研究生。研究方向为陶瓷关节轴承制造关键技术。E-mail:paulzuo03@163.com。

本文引用格式:

李颂华,薛宝圆,左闯. Si₃N₄耐高温全陶瓷向心关节轴承磨损性能研究[J]. 中国机械工程, 2025, 36(9):1989-1995.
LI Songhua, XUE Baoyuan, ZUO Chuang. Study on Wear Performance of Si₃N₄ High Temperature Resistant All Ceramic Spherical Plain Bearings [J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(9):1989-1995.