

DOI:10.11918/202003103

润滑油黏度对高速球轴承性能及损伤的影响

袁巨龙¹, 佟耀力¹, 王金虎¹, 吕冰海¹, 马立兴¹, 王东峰^{1,2}

(1.浙江工业大学 机械工程学院超精密加工研究中心,杭州 310023; 2.洛阳轴承研究所有限公司,河南 洛阳 471039)

摘要:为探究高速工况下润滑油黏度对轴承润滑状态及性能的影响,试验研究了 Si₃N₄ 陶瓷和 GCr15 轴承钢材质的 7014C 型角接触球轴承在不同润滑油黏度条件下的温升和振动特性。结果表明,轴承温升及振动随润滑油黏度的增大呈现出先下降后上升的趋势,影响程度随转速的增大而增大。同时,陶瓷轴承较钢制轴承在不同润滑油黏度条件下均表现出更优越的性能。将试验结果与轴承润滑状态分析结合,讨论了润滑油黏度、润滑状态、轴承性能三者的关系,为高速角接触球轴承适用润滑油黏度的选择提供了重要依据。此外,本文还对不同润滑条件下的轴承滚动面损伤进行了分析。结果显示,全膜弹流润滑条件下,陶瓷轴承与钢制轴承滚动面损伤较小且差异不明显。部分膜弹流润滑条件下的轴承滚动面损伤严重,表面出现大量凸峰和凹谷,轴承滚动体及外滚道表面损伤较内滚道严重,钢制滚动体的表面划痕较陶瓷滚动体密且深。

关键词:角接触球轴承;润滑油黏度;温升;振动;表面损伤

中图分类号: TH 133.33 ; TH 117.2

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2021)01-0094-07

Effect of lubricant viscosity on the performance and damage of high speed ball bearing

YUAN Julong¹, TONG Yaoli¹, WANG Jinhui¹, LÜ Binghai¹, MA Lixing¹, WANG Dongfeng^{1,2}

(1.Ultra-precision Machining Center, College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

2.Luoyang Bearing Science & Technology Co., Ltd, Luoyang 471039, Henan, China)

Abstract: To explore the influence of lubricant viscosity on the lubrication condition and performance of bearings under high speed condition, the temperature rise and vibration characteristics of 7014C angular contact ball bearings made of Si₃N₄ ceramic and GCr15 steel under different lubricant viscosities were studied. The results show that the temperature rise and vibration of bearings decrease firstly and then increase with the increasing of lubricant viscosity, and the effect increases with the increasing of rotating speed. At the same time, ceramic bearings show better performance than steel bearings under different lubricant viscosities. By combining the test results with the analysis of lubrication condition, the relationship among lubricant viscosity, lubrication condition and performance of bearing is discussed, which provides important basis for selection of the applicable lubricant viscosity of high speed angular contact ball bearings. In addition, the rolling surface damage under different lubrication conditions was analyzed. The results show that the rolling surface damage of both ceramic bearing and steel bearing is small and with little difference under full oil-film EHL. Under partial oil-film EHL, the surface damage of bearing is serious, with a large number of micro peaks and pits. The surface damage on bearing balls and outer raceway is more serious than that of inner raceway, and the surface scratch on steel balls is denser and deeper than that of ceramic balls.

Keywords: angular contact ball bearings; lubricant viscosity; temperature rise; vibration; surface damage

高速角接触球轴承是广泛应用于高速电主轴的核心基础件,相比动静压轴承、磁悬浮轴承,具有摩擦力矩小、尺寸标准化、生产成本低、维护简单方便等优点^[1-2]。影响高速角接触球轴承服役性能的主要因素有轴承材料^[3-4]、结构形式^[5]、制造精度^[6]、预紧力^[7-8]、工作温度^[9]、润滑条件^[10]等。其中,良

好的润滑状态是轴承正常运行的前提,也是影响高速轴承振动特性的重要因素。

润滑油被称为轴承除内外套圈、保持架、滚动体之外的“第五大件”,起着减小摩擦磨损、降低工作温度、缓和重载及冲击载荷等重要作用。目前,在高速滚动轴承润滑方面的研究多集中于供油量、供油方式等因素。李松生等^[11]研究发现,对应某一特定工况,总存在一个最佳供油量使轴承能够处于最佳润滑状态。胡志宏等^[12]研究了高速轴承在不同工况下的润滑状态,发现润滑油膜制约着轴承的极限转速,轴向预载荷对内部接触区的润滑状态影响不大。

收稿日期: 2020-03-28

基金项目: NSFC-河南联合基金(U1604254); NSFC-浙江两化融合联合基金(U1809221); 国家重点研发计划重点专项(2018YFB2000400, 2018YFB2000500)

作者简介: 袁巨龙(1962—),男,教授,博士生导师

通信作者: 王金虎, wangjinhui@zjut.edu.cn

黏度是润滑油最重要的性能指标,对轴承的润滑状态、滚动体与滚道接触区域油膜厚度、滚动体与滚道的摩擦力等起到了决定性作用. 目前,润滑油黏度对轴承高速性能的影响机理仍不十分明确,实际应用中润滑油黏度的选择缺乏理论依据,对轴承的服役性能及使用寿命造成很大影响. 明确润滑油黏度、密度等理化性能,以及润滑油膜厚度、油膜摩擦力等弹流润滑特性对高速轴承性能的影响,对改善高速轴承的润滑状态具有重要意义.

鉴于此,本文通过 T30-70 轴承高速试验机对 7014C 轴承进行高速工况下的黏度影响试验,测试陶瓷轴承和钢制轴承在不同润滑油黏度条件下的振动和温升值,对比不同润滑条件下轴承滚动面损伤

特征. 结合试验结果和理论分析,研究润滑油黏度对陶瓷轴承和钢制轴承高速性能及滚动面损伤的影响机制,为高速角接触球轴承的适用润滑油黏度选择提供依据.

1 试验

1.1 试验轴承与设备

试验采用钢制角接触球轴承和陶瓷角接触球轴承进行对比,其中钢制轴承型号为 H7014CP4,滚动体与套圈材质均为 GCr15,陶瓷轴承型号为 H7014C/HQ1P4,滚动体为 Si_3N_4 ,套圈材质为 GCr15. 两种型号的角接触球轴承主要结构参数相同,详见表 1.

表 1 7014C 型角接触球轴承结构参数

Tab.1 Structural parameters of 7014C type angular contact ball bearing

轴承外径/mm	轴承内径/mm	球径/mm	球数	接触角/(°)	内滚道沟曲率系数	外滚道沟曲率系数
110	70	9.525	25	15	0.515	0.525

高速工况下的黏度影响试验在图 1 所示的 T30-70 型高速轴承试验机(洛阳轴承研究所有限公司)上进行,其轴系结构如图 2 所示,该试验机最高转速为 $33\ 000\ r/min^{-1}$. 每次试验安装前后两套轴承,液压油缸通过加载套将预紧力施加于试验轴承 2 并通过试验轴传递给试验轴承 1. 根据轴承类型及实际经验,采取轴向预紧力 600 N. 通过温度传感器和振动传感器测量试验轴承外圈的温升与轴系的振动.

试验中,润滑油油温保持 $25\ ^\circ C$ 恒定,通过图 2 所示进油喷嘴进入轴承滚道进行润滑,由定量喷油润滑系统控制进油量,恒定为 $0.5\ mL/min$,供油压力为 $1.0\ MPa$. 润滑油采用 Castrol Magna 主轴锭子油,根据工业用润滑油 ISO 黏度等级^[13]的分类,选取润滑油黏度分别为 $2.2、3.2、4.6、6.8、10.0、15.0、22.0、32.0、46.0、68.0、100.0\ mm^2/s$.

1.2 转速选定

高速轴承是指其 $d_m n$ 值 $> 1 \times 10^6\ mm \cdot r/min$ 的轴承^[2]. 试验所用 7014C 型陶瓷及钢制轴承节圆直径 $d_m = 90\ mm$,极限转速分别为 $32\ 000\ r/min$ 和 $20\ 000\ r/min$. 试验前,高速轴承试验机转速从 $500\ r/min$ 阶梯提升至 $20\ 000\ r/min$,逐级测试轴承振动信号,结果表明 $4\ 600、8\ 700\ r/min$ 为该轴系的两个共振点. 黏度影响试验分别在 $12\ 000、15\ 000$ 和 $18\ 000\ r/min$ 这 3 个转速条件下进行.

1.3 温升及振动信号的处理

试验在室温条件下进行(约 $25\ ^\circ C$),在每种润滑油黏度条件下,试验机快速升至目标转速后持续运转 5 h,每隔 1 s 记录轴承温度及振动信号,温升值采用最终温度减去环境温度表示. 轴承振动通过截取轴承稳定运转状态下的振动信号,计算轴承振动加速度级^[14]来描述:

$$L = 20 \lg(a/a_0).$$

式中: L 为轴承振动加速度级, dB; a 为轴承振动加速度均方根值, m/s^2 ; a_0 为参考加速度, $a_0 = 9.81 \times 10^{-3}\ m/s^2$.

同时,引入峭度指标反应振动信号分布特性的数值统计特征. 峭度可以对低幅值进行抑制,突出

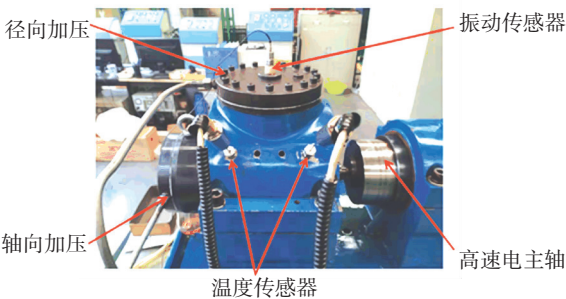


图 1 T30-70 型高速轴承试验机

Fig.1 T30-70 type high speed bearing testing machine

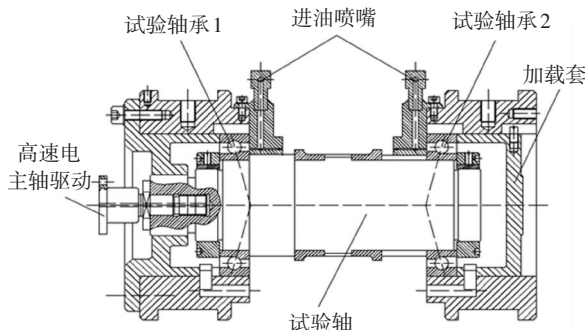


图 2 试验系统轴系结构

Fig.2 Shafting structure of the test system

高幅值信号,对振动信号中的摩擦冲击特征十分敏感. 峭度可表示为

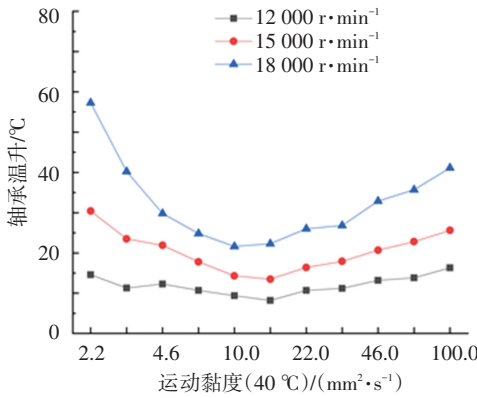
$$K = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \right)^4$$

式中: x_i 为振动加速度值, \bar{x} 为振动加速度均值, σ 为振动加速度标准差. 正常回转的轴承振动信号分布接近于正态分布,峭度值在 3 左右. 若出现了较大幅值的振动,则信号幅值分布偏离正态分布,峭度值也随之增大.

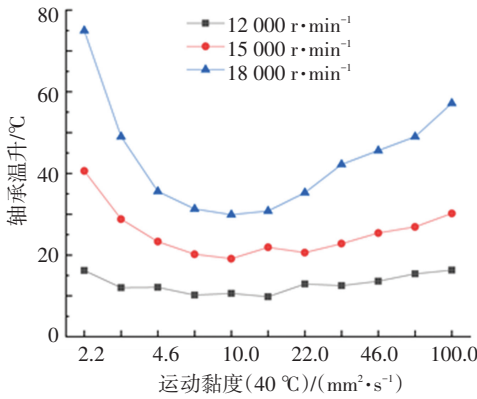
2 结果与分析

2.1 润滑油黏度对轴承温升及振动的影响

陶瓷轴承与钢制轴承在不同工况下的温升情况如图 3(a)和图 3(b)所示.



(a) 陶瓷轴承



(b) 钢制轴承

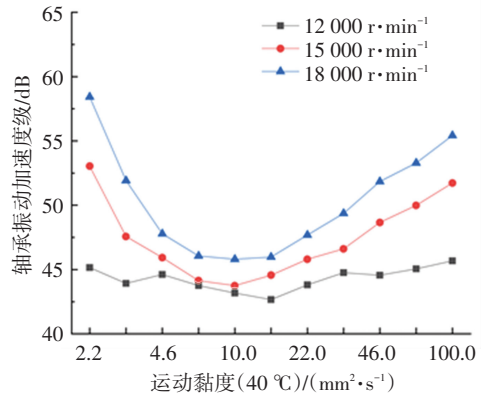
图 3 不同润滑油黏度条件下的轴承温升

Fig.3 Temperature rise of bearings under different lubricant viscosities

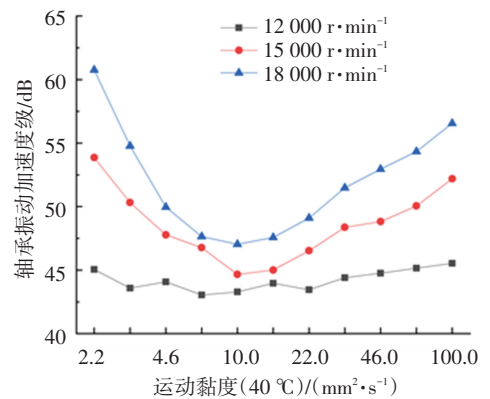
两种轴承的试验温升均随润滑油黏度增大呈现出先下降后上升的 U 形曲线,高黏度润滑和低黏度润滑都会造成轴承工作温度升高. 转速为 12 000 r/min 时,润滑油黏度对轴承温升影响较小,钢制轴承与陶瓷轴承的温升情况相近,均在 15 °C 左右. 随着转速增大为 15 000 和 18 000 r/min,相同黏度条件下的钢制轴承温升逐渐大于陶瓷轴承. 并且,高转速时润滑油

黏度对轴承温升影响较大;两种轴承温升在润滑油黏度 2.2 ~ 6.8 mm²/s 时迅速减小;在黏度 22 ~ 100 mm²/s 时缓慢增大.

图 4(a)和图 4(b)展示了不同工况下陶瓷轴承和钢制轴承振动加速度级的变化情况. 转速为 12 000 r/min 时,振动变化较小,各黏度条件下的钢制轴承与陶瓷轴承振动加速度级均位于 44 dB 左右. 转速为 15 000 r/min 和 18 000 r/min 时,两种轴承的振动曲线在润滑油黏度 2.2 ~ 6.8 mm²/s 时急剧下降,在黏度 22 ~ 100 mm²/s 时缓慢上升,并且相同黏度条件下钢制轴承振动大于陶瓷轴承. 高黏度润滑和低黏度润滑都会使轴承的振动增大,且轴承的转速越高,振动受黏度变化的影响越明显. 轴承振动曲线随润滑油黏度的变化与温升曲线相似,这是因为温度会影响轴承的动刚度^[15],进而影响到轴承的振动.



(a) 陶瓷轴承



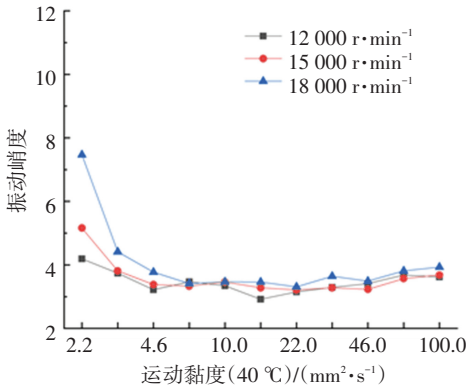
(b) 钢制轴承

图 4 不同润滑油黏度条件下的轴承振动

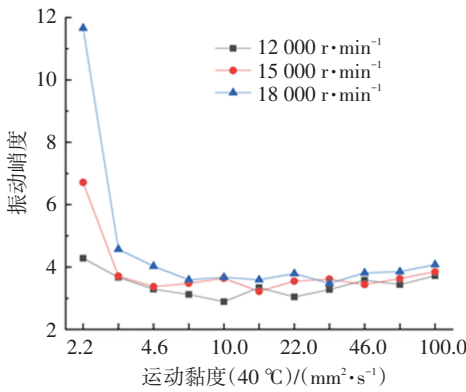
Fig.4 Vibration of bearings under different lubricant viscosities

图 5(a)和图 5(b)为不同工况下陶瓷轴承和钢制轴承振动信号的峭度变化情况. 由图 5 可知,在低黏度润滑时,两种轴承振动信号的峭度明显增大,意味着出现了高幅值的振动信号;在高黏度润滑时,虽然轴承的振动值较大,但振动信号的峭度变化较小. 钢制轴承在低黏度、高转速工况 2.2 mm²/s、15 000 r/min 和 2.2 mm²/s、18 000 r/min 运转时,振

动信号的峭度明显大于陶瓷轴承.



(a) 陶瓷轴承

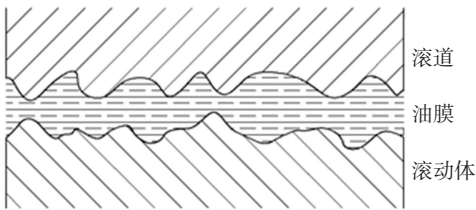


(b) 钢制轴承

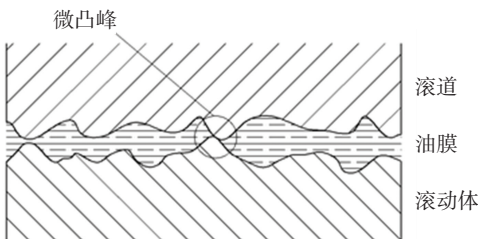
图 5 不同润滑油黏度条件下的轴承振动峭度

Fig.5 Kurtosis of bearing vibration under different lubricant viscosities

根据滚动体与滚道接触区域的润滑油膜能否完全隔开滚动体与滚道, 轴承的润滑状态可以分为全膜弹流润滑和部分膜弹流润滑^[16], 其微观润滑状态分别如图 6(a) 及图 6(b) 所示.



(a) 全膜弹流润滑



(b) 部分膜弹流润滑

图 6 轴承润滑状态与微观接触模型

Fig.6 Bearing lubrication conditions and micro contact models

低黏度润滑时, 润滑油膜厚度薄, 轴承处于部分膜弹流润滑状态, 油膜无法完全隔开接触区两表面, 产生一定程度的微凸峰摩擦碰撞. 润滑油黏度越小, 微凸峰摩擦碰撞越严重, 图 5 中低黏度时峭度的急剧增大反映了振动信号中的摩擦冲击特征. 微凸峰摩擦加剧导致轴承低黏度润滑时温升增大, 微凸峰碰撞使滚动面出现划痕和损伤, 导致轴承振动急剧增大.

高黏度润滑时, 轴承处于全膜弹流润滑状态, 油膜厚度可以完全隔开接触区两表面, 不存在微凸峰摩擦, 滚道通过油膜的摩擦力拖动滚动体进行回转运动. 全膜弹流润滑状态下, 润滑油的黏度越大, 油膜对滚动体的摩擦力越大, 造成轴承摩擦损耗增大, 温度升高, 轴承的动刚度降低, 轴承振动增大. 由于油膜摩擦相较于微凸峰摩擦更加平稳, 故高黏度润滑时轴承振动中的冲击信号较少, 峭度的变化也较小, 如图 5 所示.

对比陶瓷轴承和钢制轴承可以发现, 在转速为 12 000 r/min 时, 两种轴承的温升曲线和振动曲线都比较相近, 当转速提升到 15 000 r/min 和 18 000 r/min 时, 钢制轴承的温升与振动逐渐大于陶瓷轴承. 这是因为 GCr15 轴承钢的密度远大于 Si₃N₄ 陶瓷, 高速回转时钢制滚动体的离心力远大于陶瓷滚动体, 滚动体与滚道间接触力更大, 同工况下钢制轴承的油膜厚度更薄. 在低黏度时, 更大的接触力和更薄的油膜厚度会使钢制轴承的微凸峰摩擦较陶瓷轴承更加剧烈, 表现为图 5 中钢制轴承在低黏度的峭度较陶瓷轴承大. 而在高黏度时, 钢制轴承接触力更大, 油膜厚度更薄, 油膜摩擦力更大, 所以温升更高, 振动更大. 因此在高速回转时, 陶瓷轴承相比于钢制轴承表现出更加优异的性能.

循环油润滑时, 轴承外圈温度一般不超过 95 ℃^[17], 轴承振动加速度级 < 50 dB^[14]. 根据试验结果, 各工况下 7014C 型角接触球轴承的适用黏度范围如表 2 所示.

表 2 7014C 型角接触球轴承适用润滑油黏度

Tab.2 Applicable lubricant viscosities of 7014C type angular contact ball bearings

轴承型号	转速/ (r · min ⁻¹)	适用润滑油黏度/ (mm ² · s ⁻¹)
陶瓷轴承 (H7014C/HQ1P4)	12 000	2.2~100.0
	15 000	3.2~68.0
	18 000	4.6~32.0
钢制轴承 (H7014CP4)	12 000	2.2~100.0
	15 000	4.6~68.0
	18 000	4.6~22.0

2.2 滚动面损伤

由上述试验结果与分析可知, 润滑油黏度 $2.2 \text{ mm}^2/\text{s}$ 、转速 $18\ 000 \text{ r}/\text{min}$ 工况下, 两种轴承为部分膜弹流润滑状态; 润滑油黏度 $10 \text{ mm}^2/\text{s}$ 、转速 $18\ 000 \text{ r}/\text{min}$ 工况下, 两种轴承为全膜弹流润滑状态. 将上述两种工况下持续运转 100 h 后的陶瓷轴承与钢制轴承拆解, 分别对滚动体及滚道表面质量进行检测, 并与其初始表面对比, 研究滚动面的损伤特征.

两种轴承的滚动体、内滚道、外滚道表面粗糙度测量结果如图 7 所示. 在全膜弹流润滑状态下运转时滚动面粗糙度变化较小, 部分膜弹流润滑状态下运转 100 h 后滚动面粗糙度明显大于其初始值, 表面损伤严重. 在部分膜弹流润滑状态下持续运转

后, 陶瓷轴承的滚动体、内滚道、外滚道粗糙度变化程度均小于钢制轴承, 表明陶瓷轴承对恶劣工况的适应性较钢制轴承更强, 陶瓷滚动体不但自身耐磨性较钢制滚动体更好, 而且对滚道的损伤更小. 部分膜弹流润滑状态下, 内滚道表面粗糙度变化较小, 滚动体与外滚道的表面粗糙度变化较大, 因为高速回转时轴承外接触角小于内接触角, 外滚道与滚动体接触区域的压应力大于内滚道与滚动体接触区域, 导致外滚道与滚动体表面更容易受到损伤. 如图 8 所示, 在部分膜润滑状态下持续运转后, 两种材质的滚动体表面均存在多处划痕, 钢制滚动体表面划痕较陶瓷滚动体密且深, 多次测量的偏差较大, 表面质量一致性差.

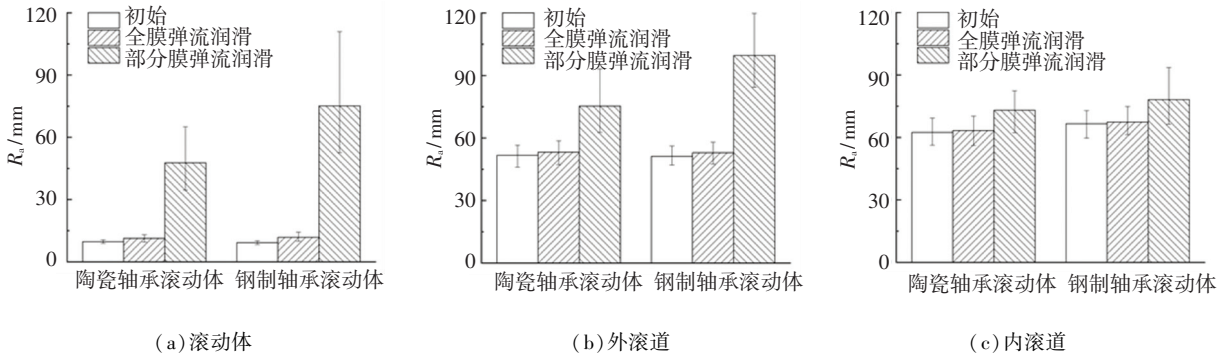
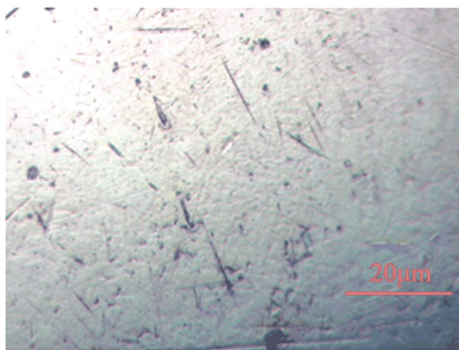
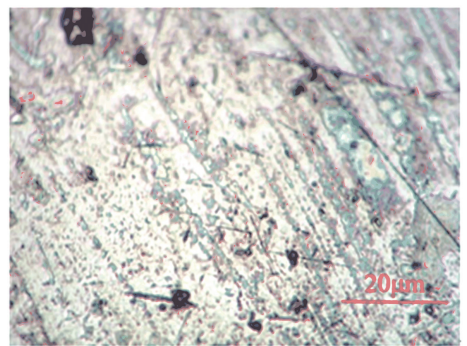


图 7 试验前后轴承各零件表面粗糙度变化

Fig.7 Surface roughness changes of bearing parts before and after test



(a) 陶瓷滚动体(200x)



(b) 钢制滚动体(200x)

图 8 部分膜弹流润滑试验后滚动体表面划痕

Fig.8 Scratches on the surface of bearing balls after partial oil-film EHL test

用光学 3D 表面轮廓仪(CHOTEST SuperView W1) 对各滚动体表面进行检测, 得到图 9 所示的滚动体表面 3D 轮廓. 其中, 图 9(a) 与图 9(b) 所示为陶瓷及钢制滚动体的初始表面轮廓. 轴承在全膜弹流润滑状态下油膜较厚, 能够将滚动体与滚道表面绝大部分微凸峰分隔开来, 滚动体表面微凸峰摩擦较少, 损伤较小, 如图 9(c) 及图 9(d) 所示. 试验后滚动体表面的粗糙度值

相比于初始表面的粗糙度值略微增大, 陶瓷滚动体与钢制滚动体的表面质量差异较小. 在部分膜弹流润滑状态下持续运转后, 由于表面微凸峰摩擦碰撞情况严重, 两种轴承的滚动体均出现明显的峰谷, 表面损伤严重, 如图 9(e) 及图 9(f) 所示. 其中钢制滚动体表面凸峰较高, 凹谷较深, 表面出现较为明显的一字型峰谷交界为滚动体表面的划痕损伤, 极大地影响了轴承的性能.

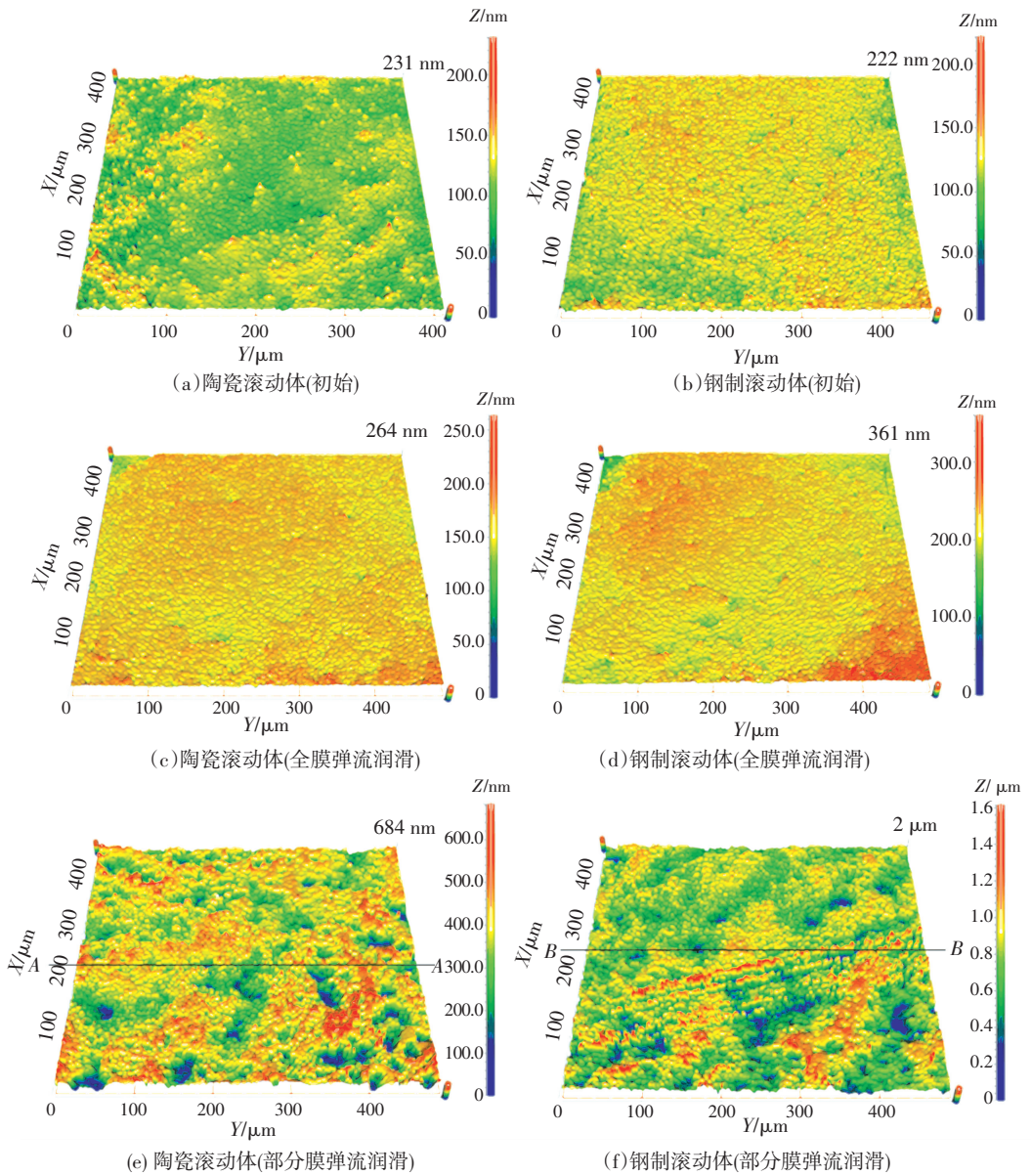
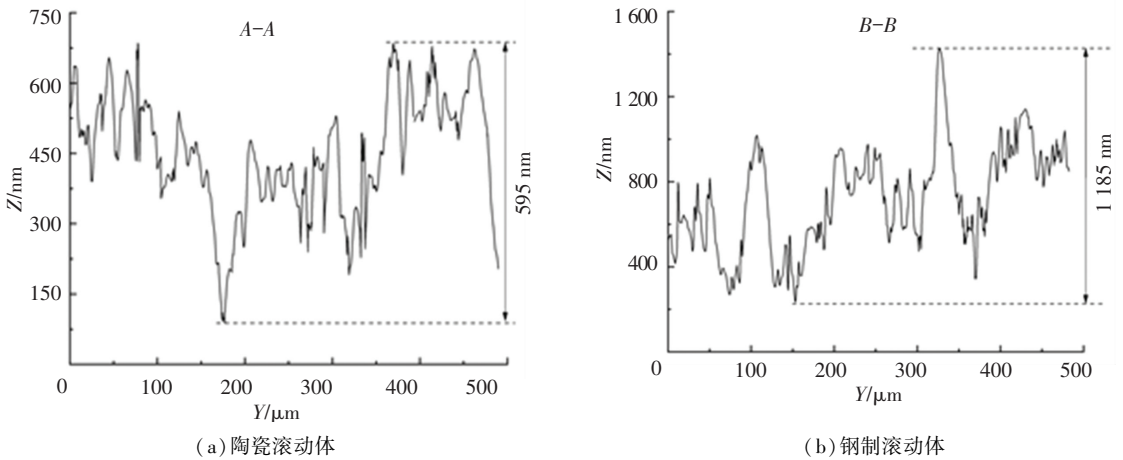


图 9 不同润滑状态下的滚动体表面 3D 轮廓

Fig.9 3D surface profiles of bearing balls under different lubrication conditions

为比较部分膜弹流润滑试验条件下陶瓷及钢制滚动体表面的损伤程度,在图 9(e)及图 9(f)所示表

面轮廓上分别沿直线 A - A、B - B 截取滚动体表面轮廓,如图 10 所示.



(a) 陶瓷滚动体

(b) 钢制滚动体

图 10 部分膜弹流润滑试验后滚动体表面轮廓

Fig.10 Surface profiles of bearing balls after partial oil-film EHL test

陶瓷滚动体在 $A - A$ 段轮廓线上的最大高度差为 595 nm, 远小于钢制滚动体在 $B - B$ 线段上的高度差 1 185 nm. 这是因为同工况下钢制滚动体受到的微凸峰摩擦较陶瓷滚动体严重, 且 GCr15 轴承钢的硬度也低于 Si_3N_4 陶瓷, GCr15 钢制滚动体耐磨性差于 Si_3N_4 陶瓷滚动体.

3 结 论

1) 高速工况下, 随着角接触球轴承润滑油黏度的增大, 其温升与振动均呈现出先下降后上升的趋势.

2) 润滑油黏度对角接触球轴承高速性能的影响程度随转速的增大而增大, 即适用的润滑油黏度范围随转速的增大而减小.

3) 转速为 12 000 r/min 时, 陶瓷轴承与钢制轴承性能差别不大. 然而, 随着转速增加, 陶瓷轴承表现出更优越的性能, 适用的润滑油黏度范围也较钢制轴承更广.

4) 全膜弹流润滑条件下, 陶瓷轴承与钢制轴承滚动面损伤较小且差异不明显. 部分膜弹流润滑条件下的轴承滚动面损伤严重, 表面出现大量凸峰和凹谷, 轴承滚动体及外滚道表面损伤较内滚道严重, 钢制滚动体的表面划痕较陶瓷滚动体密且深.

参 考 文 献

[1] 窦怀洛, 郭丽娟, 肖如锋, 等. 数控机床高速电主轴技术及应用[J]. 机电工程技术, 2011, 40(4): 85
DOU Huailuo, GUO Lijuan, XIAO Rufeng, et al. The technology of high-speed motorized spindle of digit control machine tool and its application[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2011, 40(4): 85. DOI: 10.3969/j.issn.1009-9492.2011.04.024

[2] 邓四二, 贾群义, 薛进学. 滚动轴承设计原理[M]. 2 版. 北京: 中国标准出版社, 2014: 1

[3] 张翼, 胡广存, 满维伟. 不同材质滚动体轴承性能对比试验验证[J]. 装备制造技术, 2019(7): 134
ZHANG Yi, HU Guangcun, MAN Weiwei. Test verification on performance of bearing with different material rolling[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2019(7): 134. DOI: 10.3969/j.issn.1672-545X.2019.07.038

[4] TONICELLO E, GIRODIN D, SIDOROFF C, et al. Rolling bearing applications; Some trends in materials and heat treatments[J]. Materials Science and Technology, 2012, 28(1): 23. DOI: 10.1179/1743284711Y.0000000066

[5] ZHENG Dexing, CHEN Weifang, LI Miaomiao. An improved model on forecasting temperature rise of high-speed angular contact ball bearings considering structural constraints[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2018, 70(1): 15. DOI: 10.1108/ILT-06-2016-0133

[6] WANG Yunlong, WANG Wenzhong, ZHANG Shengguang, et al. Effects of raceway surface roughness in an angular contact ball bearing[J]. Mechanism and Machine Theory, 2018, 121: 198. DOI:

10.1016/j.mechmachtheory.2017.10.016

[7] LI Xiaohu, ZHANG Yanfei, HONG Jun, et al. Experiment analysis of spindle performance with rolling bearing under non-uniform preload[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2016, 230(17): 3135. DOI: 10.1177/0954406215605867

[8] ZHANG Jinhua, FANG Bin, HONG Jun, et al. Effect of preload on ball-raceway contact state and fatigue life of angular contact ball bearing[J]. Tribology International, 2017, 114: 365. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.04.029

[9] POPESCU G. The influence of operating temperature and bearing steel structure in shakedown of three-dimensional elastic-plastic rolling contacts[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 724: 012031. DOI: 10.1088/1757-899X/724/1/012031

[10] WANG Yunlong, WANG Wenzhong, LI Yulong, et al. Lubrication and thermal failure mechanism analysis in high-speed angular contact ball bearing[J]. Journal of Tribology, 2018, 140(3): 031503. DOI: 10.1115/1.4038356

[11] 李松生, 周鹏, 黄晓, 等. 基于油气润滑的超高转速电主轴轴承润滑性能的试验研究[J]. 润滑与密封, 2011, 36(10): 25
LI Songsheng, ZHOU Peng, HUANG Xiao, et al. Experimental study of the lubricating performances for electric spindle bearings running in ultra high speed lubricated by oil-air[J]. Lubrication Engineering, 2011, 36(10): 25. DOI: 10.3969/j.issn.0254-0150.2011.10.007

[12] 胡志宏, 李松生, 陈萍, 等. 超高速电主轴轴承内部润滑状态分析[J]. 润滑与密封, 2009, 34(10): 31
HU Zhihong, LI Songsheng, CHEN Ping, et al. Analysis of lubricating status in ultra high-speed spindle bearings[J]. Lubrication Engineering, 2009, 34(10): 31. DOI: 10.3969/j.issn.0254-0150.2009.10.008

[13] 工业液体润滑剂 ISO 黏度分类: GB/T 3141—94[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994
Industrial liquid lubricants—ISO viscosity classification: GB/T 3141—94[S]. Beijing: Standards Press of China, 1994

[14] 孙立明, 杨林, 郭长建, 等. 滚动轴承振动(加速度)测量方法及技术条件: GB/T 32333—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015
SUN Liming, YANG Lin, GUO Changjian, et al. Rolling bearings: Measuring methods and specifications for vibration (acceleration): GB/T 32333—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015

[15] 蒋云帆, 廖明夫. 航空发动机高压转子前轴承刚度特性分析[J]. 推进技术, 2014, 35(8): 1123
JIANG Yunfan, LIAO Mingfu. Stiffness characteristics analysis on high-pressure rotor front bearing of aero-engine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2014, 35(8): 1123. DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2014.08.016

[16] HARRIS T A, KOTZALAS M N. Rolling bearing analysis: Advanced concepts of bearing technology[M]. 5th ed. Boca Raton: Chemical Rubber Company Press, 2007: 101

[17] 杨伟, 汤洁. 滚动轴承寿命与可靠性试验及评定: GB/T 24607—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009
YANG Wei, TANG Jie. Rolling bearings: Test and assessment for life and reliability: GB/T 24607—2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009