

◀试验与分析▶

氮化硅陶瓷滚子轴承的高速性能试验

李鸿亮^{1,2,3,4} 张占立¹ 李建华^{2,3,4} 王玉飞^{2,3,4}

(1. 河南科技大学 河南 洛阳 471003; 2. 洛阳轴研科技股份有限公司 河南 洛阳 471039; 3. 河南省高性能轴承技术重点实验室 河南 洛阳 471039; 4. 滚动轴承产业技术创新战略联盟 河南 洛阳 471039)

摘要: 为了对比分析普通钢制滚子轴承和混合陶瓷滚子轴承的高速性能,对套圈材料为 8Cr4Mo4V、保持架材料为铝青铜、滚子材料分别为 8Cr4Mo4V 钢和氮化硅的 2 种轴承进行了试验。结果表明:在相同工况下,混合陶瓷滚子轴承不仅高速性能远优于全钢轴承,且功率消耗明显低于全钢轴承。

关键词: 圆柱滚子轴承; 混合陶瓷滚子轴承; 氮化硅; 高速性能; 试验

中图分类号: TH133.33; V231.6 **文献标志码:** B **文章编号:** 1000-3762(2015)08-0033-03

High Speed Performance Test for Silicon Nitride Ceramic Roller Bearings

Li Hongliang^{1,2,3,4} Zhang Zhanli¹ Li Jianhua^{2,3,4} Wang Yufei^{2,3,4}

(1. Henan University of Science and Technology Luoyang 471003, China; 2. Luoyang Bearing Science & Technology Co., Ltd. Luoyang 471039, China; 3. Henan Key Laboratory of High Performance Bearing Technology Luoyang 471039, China; 4. Strategic Alliance for Technology Innovation in Rolling Bearing Industry Luoyang 471039, China)

Abstract: In order to comparatively analyze high speed performance for ordinary steel roller bearings and hybrid ceramic roller bearings, the tests are carried out for two kinds of bearings with rollers made of steel 8Cr4Mo4V and silicon nitride, rings made of 8Cr4Mo4V and cages made of aluminum bronze. The result shows that the high speed performance and power consumption of hybrid ceramic roller bearings are more superior to those of steel roller bearings under same operating condition.

Key words: cylindrical roller bearing; hybrid ceramic roller bearing; silicon nitride; high speed performance; test

随着科学技术的发展,对滚动轴承高速性能的要求也越来越高,为了改善特殊工况用轴承的高速性能,应用氮化硅陶瓷材料制造滚动体和其他零件已成为首选,这主要得益于氮化硅陶瓷较低的密度,优良的高温力学性能和高温(1 300 ℃)化学稳定性^[1]。装有氮化硅陶瓷球的混合陶瓷球轴承已大量应用于高速机床、燃气轮机、涡轮增压器等高速结构中,但氮化硅陶瓷滚子比球的加工工艺复杂,故混合陶瓷滚子轴承的性能仍在试验研究中^[2]。

下文通过对混合陶瓷滚子轴承和钢滚子轴承进行高速试验,对比验证 2 种轴承的高速性能。

1 试验对象

试验轴承型号为 NU208,其结构如图 1 所示。套圈材料为 8Cr4Mo4V,保持架材料为铝青铜,滚子材料分别为 8Cr4Mo4V 和氮化硅,2 种材料的性能见表 1,轴承结构主参数见表 2。

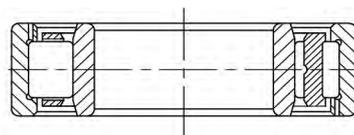


图 1 NU208 滚子轴承结构图

表 1 滚子的材料性能

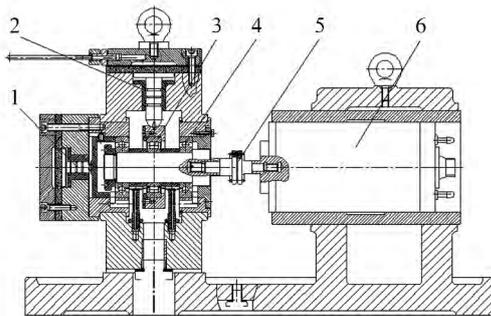
参数	8Cr4Mo4V 钢	氮化硅
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7.85×10^3	3.2×10^3
弹性模量/MPa	2.08×10^5	3.2×10^5
泊松比	0.30	0.26
线膨胀系数/($1 \cdot \text{K}^{-1}$)	11×10^{-6}	3.2×10^{-6}

表 2 NU208 滚子轴承主要参数

参数	数值
内径/mm	40
外径/mm	80
宽度/mm	18
滚子长度/mm	10
滚子直径/mm	10
滚子数量	14

2 试验设备

试验设备为简支梁高温高速试验机,其结构如图 2 所示。



1—轴向加载; 2—径向加载; 3—试验轴承; 4—支承轴承; 5—联轴器; 6—电主轴

图 2 单转子简支梁试验机

试验轴承安装于轴系中间 2 个支点端为辅助轴承;电主轴通过柔性联轴器与试验主轴相连拖动轴系高速旋转;径向载荷由径向加载活塞通过加载套直接施加于试验轴承外圈上;在试验轴承两侧有 2 只喷油嘴进行高温喷油润滑,辅助轴承通过中间 2 只喷油嘴旁路孔喷油润滑。

3 试验

随机选取混合陶瓷滚子轴承和钢滚子轴承各 1 套进行高速性能试验,试验用润滑油为长城牌 4010 合成航空润滑油。每套轴承试验前跑合 30 min 跑合试验程序见表 3。轴承高速试验程序见表 4,供油温度为 $(150 \pm 5)^\circ\text{C}$ 。

表 3 轴承跑合试验程序

序号	转速/ $(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	径向载荷/kN	运转时间/min
1	15 540	2	15
2	35 280	2	10
3	42 000	2	5

钢滚子轴承在转速达到 51 000 r/min 时,外圈温度 191°C 、温升约 45°C ,主机电流达 15.1 A,其值超过电主轴许用电流报警停机。试验过程中外圈温度曲线如图 3 所示。

表 4 轴承高速试验程序

序号	转速/ $(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	径向载荷/kN	时间/min
1	35 280	1	10
2	42 000	1	5
3	35 280	1	10
4	43 500	1	5
5	35 280	1	10
6	45 000	1	5
7	35 280	1	10
8	46 500	1	5
9	35 280	1	10
10	47 500	1	5
11	40 068	1	5
12	48 500	1	5
13	40 068	1	5
14	50 000	1	5
15	40 068	1	5
16	51 000	1	7
17	40 068	1	5
18	50 000	1	5
19	40 068	1	5
20	51 000	1	7

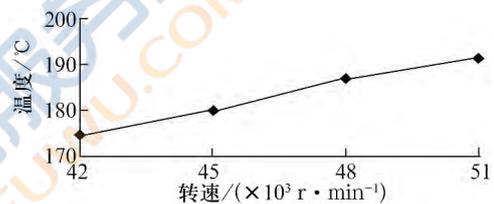


图 3 钢滚子轴承外圈温度随转速变化情况

混合陶瓷滚子轴承在转速达到 51 000 r/min 时,外圈温度 164°C 、温升约 19°C ,主机电流 10.7 A。继续提高转速进行试验,最终升至转速 62 500 r/min,轴承外圈温度约 190°C 、温升约 44°C ,主机电流达 14 A,超出驱动电主轴的转速范围,终止试验。转速 62 500 r/min 时陶瓷滚子轴承外圈温度曲线如图 4 所示。

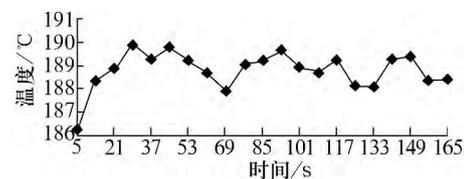


图 4 陶瓷滚子轴承 62 500 r/min 时外圈温度随时间变化情况

试验后 2 套轴承手动旋转灵活、无滞点;各零件表面外观完好,呈浅黄色;轴承内、外圈滚道受力区磨痕均匀,位置正常,其中混合陶瓷滚子轴承内滚道受力区磨痕变色较深;保持架引导面、兜孔磨痕正常,镀银层磨损正常,无基体露出以及起泡、起层等现象;滚子表面光滑无异常。试验后钢滚子轴承外观形貌如图 5 所示,检测结果表明:轴承的尺寸精度、旋转精度及游隙等指标变化不大;

陶瓷滚子轴承各项精度指标仍在标准要求范围内;由于润滑油碳化,钢滚子轴承除径向游隙减小了 0.003 mm,其他精度指标仍在标准要求范围内。

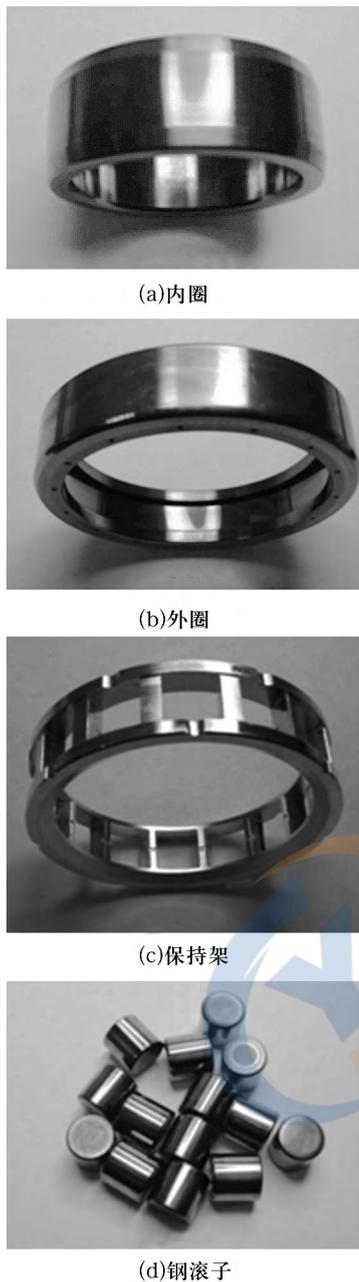


图5 试验后钢滚子轴承零件外观形貌

综上所述可知,试验后 2 套轴承旋转灵活、精度变化不大、各零件外观无异常,这说明若试验主轴驱动功率足够大,陶瓷滚子轴承转速可超过 62 500 r/min; 2 套轴承均可在 51 000 r/min 转速下运转,此时陶瓷滚子轴承试验电主轴的电流为钢滚子轴承的 70.8%,陶瓷滚子轴承外圈温升为钢滚子轴承的 42.2%;轴承外圈温度约 190 °C 时,陶瓷滚子轴承试验转速达 62 500 r/min,钢滚子轴承试验转速为 51 000 r/min,此时陶瓷滚子轴承试



图6 试验后陶瓷滚子轴承零件外观形貌

验电主轴的电流为钢滚子轴承的 92.7%。这是由于陶瓷滚子的密度较低、导热系数小和陶瓷滚子与钢滚道的摩擦因数小等,所以陶瓷滚子离心力小,轴承摩擦发热少、温升较低。

4 结论

1) 当主轴驱动功率足够大时,钢滚子 NU208 轴承的试验转速可达 51 000 r/min,陶瓷滚子 NU208 轴承的试验转速比 62 500 r/min 还要高, $d_m \cdot n$ 值可达 2.5×10^6 mm · r/min 以上。

2) 当轴承外圈温升为 45 °C 时,陶瓷滚子轴承试验转速为钢滚子轴承的 1.2 倍,且陶瓷滚子轴承试验电主轴的电流为钢滚子轴承的 92.7%,表明混合陶瓷滚子轴承的高速性能优于全钢滚子轴承。

(下转第 40 页)

EN3048 - 12 - AL 的磨损量比 EN3048 - 12 - ST 大 0.011 mm, 但仍在 EN2755 标准的要求内。

表 8 径向额定动载荷下摆动磨损量 mm

轴承型号	摆动磨损量		
	允许值	实测值	平均值
EN3048 - 12 - AL	≤0.115	0.038	0.042
		0.048	
		0.039	
EN3048 - 12 - ST	≤0.115	0.031	0.031
		0.036	
		0.024	

常温下, PTFE 织物自润滑衬垫的减摩和耐磨性能与承载 P (MPa) 和平均滑动线速度 V (mm/s) 有关, 通过计算 PV 值可评估 PTFE 织物自润滑衬垫的适用性。在航空(低速重载)工况下, 衬垫合理的 PV 值不超过 $2\ 500\ \text{MPa} \cdot \text{mm/s}^{[12-13]}$, PV 值越小衬垫磨损率越小。参考径向载荷下的最大接触应力值, 计算出轴承试验 PV 值见表 9。由表可知, EN3048 - 12 - AL 的 PV 值略大, 磨损量也相对较大, 这主要由于其硬质氧化膜表面硬度比 EN3048 - 12 - ST 硬铬层表面硬度低, 导致径向载荷下接触变形不同。

表 9 径向载荷下摆动摩擦磨损试验 PV 值

轴承型号	接触应力 P/MPa	平均滑动线速度 $V/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	PV 值 $(\text{MPa} \cdot \text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$
EN3048 - 12 - AL	411.8	3.14	1 293.1
EN3048 - 12 - ST	382.1	3.14	1 199.8

4 结论

1) 在 46.4 kN 的径向额定静载荷下, EN3048 - 12 - AL 的最大变形量和永久变形量都比 EN3048 - 12 - ST 的大, 但仍能满足 EN2755 标准要求。

2) 在 3.7 kN 的轴向额定静载荷下, EN3048 - 12 - AL 的永久变形量比 EN3048 - 12 - ST 大, 但仍能满足 EN2755 标准要求。

3) PTFE 织物自润滑衬垫的摩擦磨损性能和

PV 值有关, 线速度相同时, 接触应力越小, 磨损率越小, 耐磨性能越好。在 25.5 kN 径向额定动载荷下, EN3048 - 12 - AL 摆动磨损量比 EN3048 - 12 - ST 大, 但仍能满足 EN2755 标准要求。

由此可知, 挤压型铝合金自润滑关节轴承在常温低速摆动工况下, 完全可以替代挤压型不锈钢自润滑关节轴承。

参考文献:

- [1] 何两加. T 型自润滑关节轴承介绍 [J]. 机械工程师, 2011(4): 127 - 128.
- [2] 魏立保, 陈有光. 自润滑关节轴承的研制与应用 [J]. 轴承, 2008(5): 8 - 10.
- [3] 景绿路, 张艳, 孙忠志. 自润滑关节轴承标准分析 [J]. 航空标准化与质量, 2010, 239(5): 35 - 39.
- [4] 杨昆, 林晶. 国外航空自润滑关节轴承标准分析 [J]. 航空标准化与质量, 2013(5): 45 - 49.
- [5] 张翔, 杨明君, 黄雄荣, 等. 新型铝合金自润滑关节轴承的研究 [J]. 上海电气技术, 2010, 3(2): 40 - 43.
- [6] 狄葆璋, 洪富岳, 王云, 等. 自润滑关节轴承的磨损试验分析 [J]. 轴承, 1999(6): 25 - 26, 40.
- [7] 铝及铝合金硬质阳极氧化膜规范: GB/T19822—2005 [S].
- [8] Aerospace Material Specification—Plating, Chromium: AMS 2460—2007 [S].
- [9] AECMA Technical Report TR4475. Aerospace Series - Bearing and Mechanical Transmissions for Airframe Applications - Vocabulary [R]. AECMA, 2001.
- [10] 方智敏, 王晨, 王文. 织物衬垫型关节轴承的力学分析 [J]. 机械制造, 2014(7): 52 - 55.
- [11] Aerospace Recommended Practice ARP5448/7. Plain Bearing Wear Measurement [R]. SAE International Group, 2009.
- [12] SKF. Spherical Plain Bearings and Rod Ends [Z]. SKF: 46 - 49.
- [13] RBC. Engineering for Sphericals, Rod Ends and Journals [Z]. RBC Aerospace Bearings: 10 - 11.

(编辑: 王玉良)

(上接第 35 页)

3) 当轴承试验转速为 51 000 r/min 时, 陶瓷滚子轴承驱动电主轴电流仅为钢滚子轴承的 70.8%, 且陶瓷滚子轴承外圈温升为钢滚子轴承的 42.2%, 表明陶瓷滚子轴承功率消耗更小。

参考文献:

- [1] Doğan C P, Hawk J A. 氮化硅陶瓷的显微结构和磨粒磨损 [J]. 国外轴承, 2003(1): 30 - 36.
- [2] Stefan Strobl, Peter Supancic, Oskar Schöppl, et al. A New Strength Test Ceramic Cylinders—The Notched Roller Test [J]. Journal of European Ceramic Society, 2014(34): 2 575 - 2 584.

(编辑: 赵金库)