

弹用混合式陶瓷轴承的开发研究^{*}

王黎钦¹, 李秀娟¹, 古 乐¹, 齐毓霖¹, 刘艳梅², 刘振德²

(1. 哈尔滨工业大学 机械工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 航天机电集团公司 31 所, 北京 100074)

摘 要: 为延长弹用涡喷发动机轴承的寿命、避免过早失效和提高其可靠性, 在分析全钢轴承恶性失效形式的基础上, 根据工况对轴承性能的要求研制了混合式陶瓷轴承, 用拟静力学分析方法对比分析了全钢轴承和混合式陶瓷轴承的性能指标, 台架实验表明了陶瓷轴承以疲劳逐步扩展的良性失效形式为主要失效形式, 能够克服全钢轴承在高速高温重载限量润滑条件下发生热失稳、咬死等恶性故障, 对高速恶劣工况有很好的适应性。

关键词: 涡轮喷气发动机; 失效分析; 陶瓷; 航空轴承; 非金属轴承

中图分类号: V235.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2001) 06-0522-04

Research on hybrid ceramic bearings for missile turbojet engines

WANG Li-qin, LI Xiur-juan, GU Le, QI Yu-lin, LIU Yan-mei, LIU Zhen-de

(1. Dept. of Mechanical Engineering, Harbin Inst. of Technology, Harbin 150001 China;

2. The 31st Research Institute, Beijing 100074 China)

Abstract: To increase the service life, prevent the premature failure and improve the reliability of rolling bearings used in the missile turbojet engines, based on the analyses of all steel bearing failure with related working conditions, a kind of hybrid ceramic bearing which performances were compared with those of all steel bearings through quasi-static mechanics analyses were developed. Bench tests showed that ceramic bearings have a benign failure mode of gradual fatigue instead of catastrophic failures of thermal instability, seizure or dead lock which are very common for all steel bearings under the working conditions of high speed, high temperature, heavy load and limited lubricant. So ceramic bearings can totally meet such stringent demands in missile turbojet engines.

Key words: Turbojet engine; Failure analysis; Ceramic; Aircraft bearing; Nonmetallic bearing

1 引 言

提高轴承可靠性和延长其使用寿命是目前弹用小型涡喷发动机的关键技术之一。用轴承钢制造的轴承, 在高速和高温情况下实际使用寿命不及设计寿命的五分之一, 失效形式以非正常过量磨损、滚道烧伤、热失稳咬死等恶性失效为主, 因而仅靠改进轴承的设计和提高轴承的加工精度远不能满足要求。国外从 20 世纪 60 年代就开始了陶瓷材料用于轴承领域的研究^[1], 美国空军在 70 年代末开始研制替代全钢轴承的混合式陶瓷球轴承^[2]。目前军事技术先进国家已经将陶瓷轴承应用在新型高马赫数导弹的涡喷、涡扇发动机上^[3-6]。近十多年来, 我国

出现了陶瓷轴承研究热, 但大部分研究沿用了全钢轴承的结构、工艺和性能参数, 由于陶瓷材料和钢材料的巨大性能差异, 沿用钢轴承的参数远不能充分发挥陶瓷轴承的优异性能; 此外, 陶瓷轴承是对钢轴承极限性能的拓展而不是简单的替代, 因此极限环境下使用的高性能陶瓷轴承沿用全钢轴承的参数存在根本性的错误, 需要展开专门研究。本文针对高速高温重载限量润滑工况, 综合考虑材料、结构、工艺、工况等一系列因素而研制了高性能陶瓷轴承。

2 钢轴承在高速高温下存在的问题

涡喷发动机主轴用轴承工作在高速、高温、污

* 收稿日期: 2001-04-18; 修订日期: 2001-06-21。基金项目: 哈尔滨工业大学跨学科交叉性研究基金 (HIT. MD2000. 10)。

作者简介: 王黎钦 (1964—), 男, 博士, 教授, 研究领域为极限工况条件摩擦学和高性能陶瓷轴承技术。

染和限量润滑等恶劣工况下,按标准的航空发动机轴承设计,采用双半内圈三点接触式结构,具体工况条件如表 1 所示。

目前使用的不锈钢轴承出现了热失稳和严重磨损,如图 1 新旧轴承对比所示,保持架采用较软的合金钢制造,表面镀银,以减小启动摩擦。磨损发生在轴承内部的所有摩擦面上,包括保持架和内圈

之间的导引面、滚动体和内外套圈的沟道之间,磨损后的轴承内部结构参数遭受了彻底的破坏;出现了如图 2 所示的“软磨硬”的异常磨损现象,即较软的保持架将淬硬的不锈钢套圈磨去了很多;此外,热失稳严重时产生的局部高温有可能使轴承退火,甚至熔化,导致轴承元件断裂,套圈和滚动体咬死,如图 3 所示。

Table 1 Typical working conditions of turbojet engine mainshaft bearing

Shaft speed r/min	Bearing material	Load/N		Oil temperature / °C		Service life/h	Dimensions/mm	Storage time/y
		Radial	Axial	Inlet oil	Outlet oil			
30 000	9Cr18	1 500	4 000	80	150~ 180	≤ 50	φ25 × φ62 × 17	8~ 10



Fig. 1 Contrast between new and worn steel bearings



Fig. 2 Break and seizure failure of steel bearing caused by thermal instability



Fig. 3 Severe wear failure in steel bearings

轴承的设计寿命 ≥ 50 h,但目前全钢轴承的实际寿命只有 8 h~ 10 h,即轴承装上发动机运转考核时,在产生剧烈振动、严重磨损、或者卡死以前的实际运转累计小时数,而不是疲劳寿命。按常规的轴承寿命计算为 $L = [f_1 C/P]^{1/\alpha_1} \alpha_2 \alpha_3$,其理论疲劳寿命远大于上述实际寿命值(f_1 , α_1 , α_2 , α_3 分别是温度修正系数、可靠性修正系数、材料修正系数、润滑剂污染修正系数)。

分析表明,目前使用的全钢轴承的失效形式不是疲劳,而是在振动条件下的严重磨损和热失稳。原因是 9Cr18 不锈钢轴承的耐高温性能差,短期最高使用温度在 200 °C 以下;在目前限量润滑或润滑不可靠(因泄漏和耗散导致贫油)的情况下,轴承元件材料之间的摩擦匹配性能不好;此外,严重磨损颗粒对有限润滑油的严重污染将进一步加剧轴承内摩擦面的磨损,形成磨损、润滑油污染之间的恶性循环。

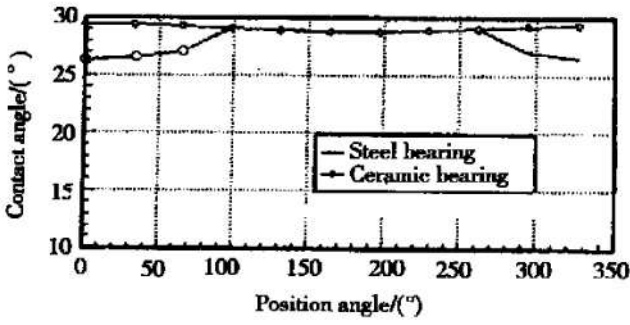
3 混合式陶瓷轴承性能的理论分析

陶瓷材料具有密度低、抗疲劳和抗磨损性能优、抗润滑剂污染能力强、热膨胀系数小、硬度高等优点,与 9Cr18 不锈钢有优良稳定的摩擦性能,即使在干摩

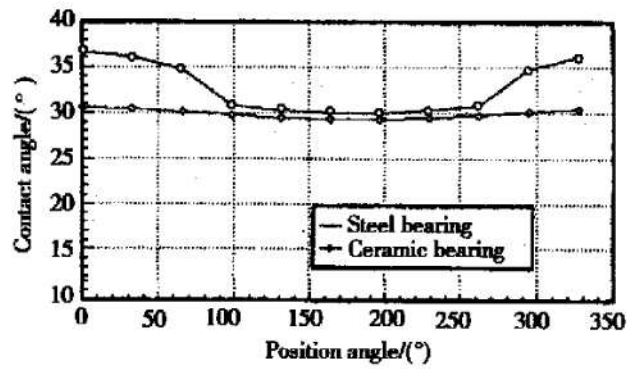
擦条件下其摩擦系数也能稳定在 0.2 以下;此外,陶瓷和钢在高温下不会出现粘接咬死等恶性失效,因此混合式陶瓷轴承从根本上可以克服全钢轴承的大部分失效形式,从而延长使用寿命和提高轴承的可靠性。

考虑材料特性及工况条件,利用轴承拟静力学分析方法对陶瓷轴承和全钢轴承进行数值分析,轴承内部各项性能指标对比如图 4 所示。由图 4(a),(d)可知,在不同方位角上的滚动体与内外套圈之间有不等的接触角,各接触角之间的差值越小,滚动体和保持架之间的冲击越小,轴承运转也越平稳,图中结果表明陶瓷轴承的接触角随滚动体的方位角变化小,因而更适合高速工况要求。

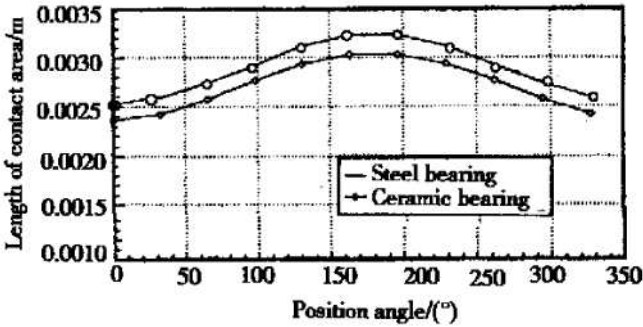
滚动体与内外套圈滚道之间的接触面积,将严重影响轴承内部的发热和接触区润滑油的温度,接触面积越小,发热越小,但接触应力越大,疲劳寿命降低,因此在疲劳不是主要失效形式的条件下,希望有较小的接触面积,以减小发热和降低对磨损的敏感性(接触面积越大、发热越重、温度越高、磨损越快、对沟曲率系数很小的发动机轴承将导致接触面积急剧增大,产生恶性循环),图 4(b)和(e)表明了陶瓷轴承的在



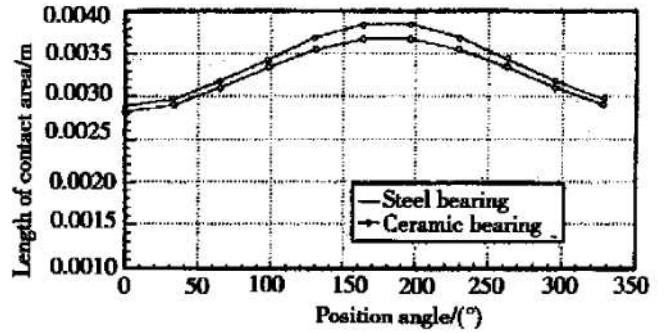
(a) Contact angle between ball and outer raceway



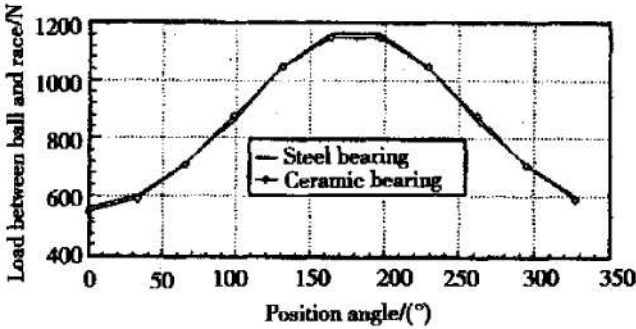
(d) Contact angle between ball and inner raceway



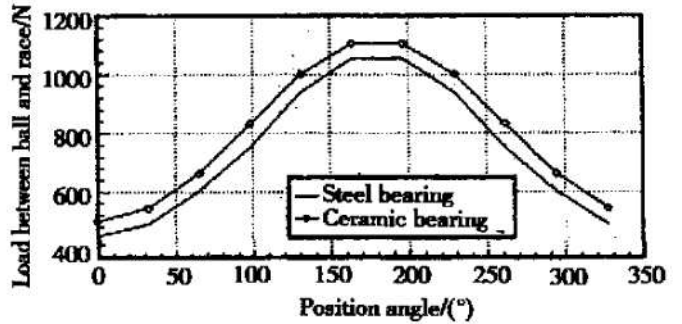
(b) Contact area between ball and outer raceway



(e) Contact area between ball and inner raceway



(c) Contact load between ball and outer raceway



(f) Contact load between ball and inner raceway

Fig. 4 Performance contrast between ceramic and all steel bearing

减小接触面积方面的优越性。

影响轴承高速疲劳寿命的主要因素有材料的抗疲劳性能和接触载荷。陶瓷材料本身有优秀的抗疲劳失效能力,疲劳寿命是轴承钢的3~5倍以上;高速轴承的离心载荷导致滚动体与套圈之间的接触应力随转速的增加成二次方急剧增大,从而缩短轴承的疲劳寿命,陶瓷轴承的附加离心载荷远小于钢轴承的离心载荷。尽管由于陶瓷的高弹性模量在同等接触条件下的接触应力较钢轴承大,但对于弹用发动机高速高温陶瓷轴承,其增大数值比离心力减小部分要小,因此,陶瓷轴承的疲劳寿命仍有大幅度提高。

评价高速高温轴承性能的另两个参数包括陀螺

力矩和滑滚比。陀螺力矩是滚动体质量和角速度分量的函数,其值越大,将导致运动越不稳定,滚动体与滚道之间的滑动越明显,发热也越大,很显然,由于氮化硅陶瓷的密度只有钢的40%,因此陶瓷轴承的陀螺力矩要比钢轴承小得多。

滚动体和滚道之间同时存在着滚动和滑动,用滑滚比表示,但当滑动超过一定值后,轴承将产生剧烈磨损和温升,很快出现过热、润滑失效、胶合和咬死。高速轴承的滑动由接触载荷、陀螺力矩、附加离心载荷以及滚动体和滚动之间的摩擦力来综合确定。综合前面的分析,和钢轴承相比较,陶瓷轴承具有较小的滑滚比,发热量少。发热是高速轴承最难解决的问

题之一,也是目前弹用钢轴承失效的主要原因之一。

综上所述,在弹用高速高温重载限量润滑工况条件下,陶瓷轴承具有更好的性能。

4 陶瓷轴承的疲劳失效行为及抗污染能力实验

高速滚动轴承如果 dn 值在 $1 \times 10^6 \text{ mm} \cdot \text{r}/\text{min}$ 以上、润滑和发热正常,则失效的主要原因就是从表面开始的疲劳和轻微的磨损。但由于陶瓷属脆性,断裂韧性只有钢的一半,人们一直担心高速重载冲击条件下陶瓷轴承的失效不是疲劳而是粉碎性的破坏。此外,由于弹用轴承的润滑油路上过滤网通径为 $100 \mu\text{m}$,过量磨损导致润滑剂污染严重,加剧了轴承的磨损进程。因此需要对陶瓷轴承的失效行为和抗污染能力进行研究。

为此进行了模拟颗粒污染条件下的疲劳和磨损寿命实验^[7],接触应力为 7 GPa ,远远高出正常的轴承接触应力 2.6 GPa 。实验结果表明,在如此高的接触应力作用下,轴承钢产生了较大的塑性变形,而混合式陶瓷轴承具有优异的抗磨损性能,抗磨损能力比钢轴承高出2倍以上,疲劳寿命至少是同类型钢轴承的3倍以上。

5 台架实验

为测试和验证混合式陶瓷球轴承的性能,在专用高速轴承实验台上对研制的 C276305 陶瓷轴承进行了模拟实验。实验过程中对轴承载荷、进油和回油温度、润滑油量、轴承转速、功耗、轴承温度、轴承外圈振动等参数进行控制和测量。实验严格模拟弹用发动机轴承工况。钢轴承在此条件下实验 6 h 后出现振动加剧,声音异常,拆下后发现磨损严重,滚道呈棕色;而陶瓷轴承在同等条件下累积实验时间超过 50 h,温升和振动均正常,拆下后发现磨损轻微,保持架上银层基本完好,实验达到了考核的要求而终止。

6 结 论

针对弹用发动机轴承的恶劣工作条件,分析了全钢轴承出现的磨损严重、温升过高、润滑油污染严重、抱轴等问题,定量计算了同尺寸的陶瓷轴承在上述工况下的性能指标,完成了陶瓷轴承在污染条件下的疲劳失效和抗污染能力实验,并对研制的 C276305 混合式陶瓷轴承进行了专用台架考核。理论和实验同时验证了所研制的陶瓷轴承的优良性能,对延长发动机轴承的工作寿命、提高可靠性等提供了全新的技术途径。

参考文献:

- [1] Wang L, Snidle R W, Gu L. Rolling contact silicon nitride bearing technology: a review of recent research[J]. WEAR, 2000, 246: 159~ 173.
- [2] Dezzani M M, Pearson P K. Hybrid ceramic bearings for difficult applications[J], Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Transactions of the ASME, 1996, 118(1), 449~ 452.
- [3] Pete Cento, Don W. Dareing. Ceramic Materials in Hybrid Ball Bearings[J]. Tribology Transactions 1999, 42(4): 707~ 714.
- [4] Wan G T Y. Increased performance of hybrid bearing with silicon nitride balls[J]. Tribology Transactions. 1997, 40(4): 701 ~ 707.
- [5] Drory M D. Performance of diamond coated silicon nitride bearings[J], Journal of Spacecraft and Rockets, 1997, 34(5), 683~ 684.
- [6] Shoda Y. The performance of a hybrid ceramic ball bearing under high speed condition with the under-race lubrication method [J]. Tribology Transactions 1997, 40(4): 676~ 684.
- [7] 金永福. 颗粒污染对陶瓷滚动接触疲劳寿命影响的研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2000.

(编辑: 盛汉泉)