

# 航空发动机附件机匣轴承失效故障复现试验

于庆杰,张大鹏,刘新宇,刁庆,闫国斌  
(中国航发哈尔滨轴承有限公司,哈尔滨 150025)

**摘要:**针对航空发动机在飞行时附件机匣的深沟球轴承发生铆钉断裂、沟道剥落2种失效故障,为了定位故障原因,开展了2套轴承外圈沟道预损伤及4套轴承铆钉断裂的轴承失效故障复现试验。结果表明:轴承故障失效时序为外圈沟道由于表面损伤先产生表面疲劳剥落,然后引发铆钉断裂;结合轴承的原材料、设计、工艺、质量及其在机匣上安装使用情况等的复查结果与轴承拆卸试验结果,确定轴承拆卸工艺不当是产生外沟道表面损伤的主要原因。采用轴承内圈拆卸工艺后可有效避免拆卸过程中的轴承沟道损伤,从而预防此类故障的发生。

**关键词:**附件机匣;轴承失效;故障复现;沟道剥落;铆钉断裂;失效时序;拆卸工艺;航空发动机

**中图分类号:**V229+2

**文献标识码:**A

**doi:**10.13477/j.cnki.aeroengine.2021.S1.020

## Fault Recurrence Test for Aeroengine Accessory Gearbox Bearing Failure

YU Qing-jie, ZHANG Da-peng, LIU Xin-yu, DIAO Qing, YAN Guo-bin  
(AECC Harbin Bearing Co., Ltd., Harbin 150025, China)

**Abstract:** Aiming at two kinds of failure faults of deep groove ball bearing of accessory gearbox in aeroengine during flight, such as rivet fracture and groove flaking, in order to confirm the failure causes, the fault recurrence tests of two outer groove pre-damage bearings and four rivet fracture bearings are carried out. The results show that the failure sequence of the bearing is that the surface fatigue flaking first occurs due to the outer groove damage of the bearing, and then the rivet fracture occurs. Combined with the reexamination results of the raw materials, design, process, quality of the bearing and the installation and use of the bearing on the gearbox, and the test results of the bearing disassembly, it is determined that the improper disassembly process of the bearing is the main reason for the outer groove damage. The bearing groove damage can be avoided effectively after the bearing inner ring disassembly process, thus preventing the occurrence of such faults.

**Key words:** accessory gearbox; bearing failure; fault recurrence; groove flaking; rivet fracture; failure sequence; disassemble process; aeroengine

## 0 引言

航空轴承作为航空发动机的重要部件,发生故障而失效将导致发动机无法正常运行,在使用过程中导致轴承出现故障的因素包括运行工况过载、异物进入、轴承设计裕度不足、材料缺陷、加工缺陷、安装使用不当等<sup>[1]</sup>,对故障进行失效分析与原因定位是最为关键的环节,在进行轴承设计与使用复查、故障件失效形貌分析的同时,也需要进行故障复现试验。

在轴承失效分析研究方面,梁华等<sup>[2]</sup>阐述了轴承常见的失效形式,并对滚动轴承接触疲劳失效的分析

方法进行了总结;谢荣华等<sup>[3]</sup>、拾益跃等<sup>[4]</sup>阐述了高速滚动轴承的失效形式及原因,并举例进行了分析;贺孝涛等<sup>[5]</sup>研究了发动机轴承保持架铆钉脱落故障,开展断口金相分析并对相关零件尺寸进行检查,指出铆钉杆与保持架孔间隙过大是导致铆钉头脱落的主要原因;罗志刚等<sup>[6]</sup>研究了深沟球轴承故障件剥落形貌,开展了铆钉强度计算分析,指出异物进入或加工及拆卸损伤是轴承失效的主要原因;徐锐<sup>[7]</sup>研究了失效轴承与发动机装配公差的关系,指出装配后轴承偏斜是导致轴承失效的主要原因;黄晓辉<sup>[8]</sup>研究了深沟

收稿日期:2019-03-25 基金项目:航空动力基础研究项目资助

作者简介:于庆杰(1990),男,工程师,主要从事轴承仿真分析技术研究与应用工作;E-mail:335848654@qq.com。

引用格式:于庆杰,张大鹏,刘新宇,等.航空发动机附件机匣轴承失效故障复现试验[J].航空发动机,2021,47(增刊1):120-123. YU Qingjie, ZHANG Dapeng, LIU Xinyu, et al. Fault recurrence test for aeroengine accessory gearbox bearing failure [J]. Aeroengine, 2021, 47(S1): 120-123.

球轴承失效形式,指出轴向载荷过大是导致轴承失效的原因;吴志平<sup>[9]</sup>研究了深沟球轴承沟道磨损失效形式,指出异物进入是轴承失效的主要原因;胡春燕等<sup>[10]</sup>通过外观检查、断口宏微观检查、硬度检测及能谱分析,指出轴承失效性质为接触疲劳失效;班君等<sup>[11]</sup>研究了锻造形成孔洞缺陷对轴承失效的影响,提出了控制锻造工艺与增加锻造缺陷检测的措施来防止轴承疲劳剥落失效;赵灵蓉等<sup>[12]</sup>研究了深沟球轴承保持架铆钉断裂因素,指出轴向振动冲击是导致轴承保持架断裂的主要原因;宋海荣<sup>[13]</sup>等在轴承失效基本特征的综合分析基础上确定轴承因早期疲劳剥落而导致最终失效;陈宇等<sup>[14]</sup>通过分析研究确定轴承失效原因为石墨颗粒进入轴承导致轴承故障。

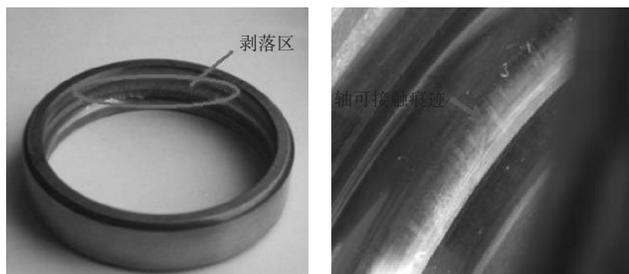
本文针对某型航空发动机在使用过程中附件机匣深沟球轴承出现的故障,开展轴承故障形貌分析与故障复现试验,结合复查结果与轴承拆卸试验结果,确定轴承失效原因,并制定改进措施。

### 1 故障形貌分析

机匣分解后轴承整体形貌如图 1 所示。经检测发现外圈沟道剥落,剥落区域长约 50 mm,宽约 7.5 mm,深约 0.01 mm,其位置处于沟底,沟道其它位置有接触压坑,如图 2 所示。2 个半保持架铆合的 10 根铆钉中有 1 根在中部断裂,其余 9 根铆钉均在原钉头处断裂。



图 1 轴承整体形貌



(a) 剥落区域 (b) 接触压坑

图 2 外圈沟道剥落区域及接触压坑形貌

在扫面电镜下观察铆钉的断口形貌,明显可见断裂源区呈现一次疲劳台阶及疲劳条带形貌<sup>[15]</sup>,如图 3 所示。观察外圈沟道剥落区放大形貌,可以判断其失效为浅表层起源失效,如图 4 所示。

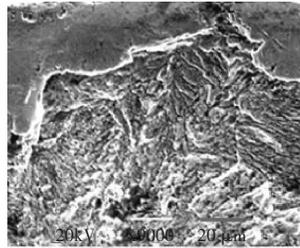


图 3 铆钉断裂源区形貌

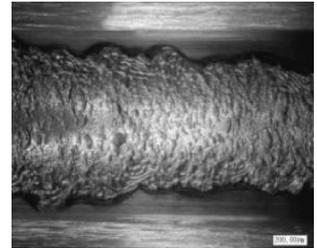


图 4 外圈沟道剥落区放大形貌

### 2 故障件失效时序试验

该型轴承故障的形式为铆钉头断裂与外沟道剥落,针对这 2 种模式分别制定试验方案,确定故障件失效时序。

轴承试验器试验方案如图 5 所示。从图中可见,在试验轴上分布着 4 个深沟球轴承,其中,端处的 2 个轴承为试验轴承,中间处的 2 个轴承为陪试轴承。由电主轴驱动提供转速,径向载荷由安装陪试轴承的试验器壳体加载并传递到试验轴承上,轴向载荷由端盖传递到壳体后再传递到试验轴承上。试验转速为 19000 r/min,径向载荷为 3000 N,轴向载荷为 2000 N。

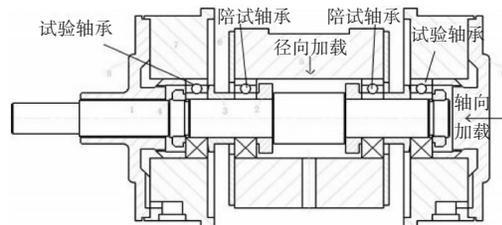


图 5 试验方案

#### 2.1 铆钉头首先断裂试验

试验共用 4 套 D209NQ 轴承,其中 2 套各在 180° 对称位置去除 2 根铆钉,如图 6 所示;另外 2 套各在相邻位置去除 2 根铆钉,如图 7 所示,以模拟铆钉首先断裂脱落的故障模式。

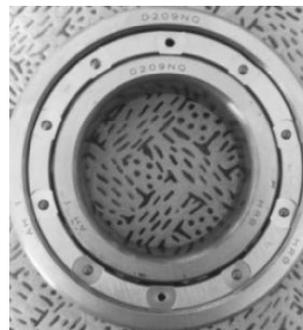


图 6 对称位置去除 2 根铆钉



图 7 相邻位置去除 2 根铆钉

4套轴承均顺利完成50 h试验,试验过程无异常,分解检查,轴承状态无异常变化。

试验结果表明,在仅去除铆钉的情况下,轴承的工作基本不受影响,因此,轴承铆钉首先断裂脱落的故障模式可以排除。

## 2.2 外沟道首先出现损伤或剥落试验

试验采用2套D209NQ轴承,1#轴承的径向游隙为 $16\ \mu\text{m}$ ,2#轴承的径向游隙为 $29\ \mu\text{m}$ 。在合套前各在外圈沟道人为制造出多个直径约为 $0.040\ \text{mm}$ 的点状压坑,如图8所示,用来模拟沟道首先出现剥落或损伤的失效形式。

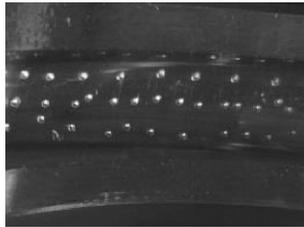


图8 外圈沟道人为制造的压坑

1#轴承在试验进行130 min后,运转声音出现异常,温度突然升高。拆卸后发现,试验器内有金属颗粒异物,试验轴承略有卡滞,外观未见异常。将试验件复装,继续试验发生严重抱轴现象。分解检查发现,铆钉头从原钉头处掉落3个,外圈沟道人为压坑部位形成鱼鳞状剥落。

2#轴承完成了50 h试验,在试验过程中振动与噪声较大,分解轴承发现,保持架铆合状态仍完好,但保持架偏斜,引导面有轻度磨损痕迹,在外圈沟道预制缺陷部位形成鱼鳞状剥落。

试验后外沟道剥落形貌如图9所示。分别对1#轴承、2#轴承、故障轴承进行宏微观损伤形貌及金相组织的观察,确认其失效模式均应属于表面起源型疲劳,失效原因应为表面损伤。



图9 外沟道剥落形貌

试验结果表明:

- (1) 轴承沟道存在损伤缺陷可导致剥落;
- (2) 铆钉断裂脱落、保持架磨损等为沟道剥落导致;
- (3) 在相同工况及缺陷状态下,轴承失效程度与轴承工作游隙有关。游隙小,轴承失效发展快,后果严重(高温抱死);游隙大,失效发展慢,程度轻(浅表层剥落)。

## 3 复查情况

对故障轴承和机匣从原材料、设计、工艺、质量等

多方面进行复查。在复查机匣装配检查工艺时,发现一点与故障有着不可排除的相关性,即在检查过程中从输入端齿轮轴上拆卸D209NQ轴承的方式为通过外圈直接拉拔拆卸。

## 4 轴承拆卸试验

### 4.1 轴承原拆卸试验

抽取10套D209NQ新品轴承,在机匣输入端齿轮轴上进行模拟拆卸试验。原拆卸试验的形式如图10所示。试验过程与原机匣正常装拆要求一致,试验后轴承整体状态无变化,铆钉及保持架完好。

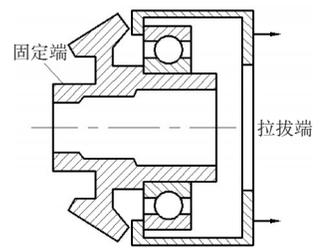


图10 原拆卸试验形式

对各试验轴承拆除铆钉后分离保持架,分解内外套圈及钢球后进行复检。对工作表面状态宏、微观形貌进行观察,并采用 $\Phi=1.5\ \text{mm}$ 球头测试笔进行触感检查,试验结果为:

- (1) 良好3套。轴承保持或接近成品轴承状态。
- (2) 一般5套。轴承出现部分工作表面质量下降,主要为点子(直径 $\leq 0.03\ \text{mm}$ )、多条划痕或集中蹭痕,未超过外观质量标准要求。
- (3) 损伤2套。轴承出现部分工作表面初始损伤,主要为划伤,采用 $\Phi=1.5\ \text{mm}$ 球头测试笔进行检查时有明显触感,划伤长度 $\geq 0.050\ \text{mm}$ ,划伤深度 $\geq 0.020\ \text{mm}$ 。

该轴承拆卸工艺对轴承造成的损伤如图11、12所示。



图11 沟道表面划伤

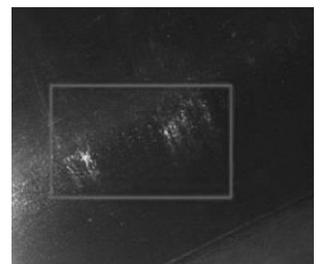


图12 沟道表面蹭痕

### 4.2 轴承拆卸改进试验

将原拆卸工艺更改为对轴承内圈拉拔拆卸,改进的拆卸试验形式如图13所示。同样抽取了10套D209NQ新品轴承,在机匣输入端齿轮轴上进行模拟拆卸试验。试验后轴承整体状态无变化,铆钉及保持架完好,各轴承拆卸后滚动接触表面质量完好,与轴配合的轴承内圈内径表面有轻微接触痕迹,但

采用  $\Phi=1.5\text{ mm}$  球头测试笔进行测试发现无深度,说明无损伤,不影响后续使用,试验后轴承内圈内径表面如图 14 所示。

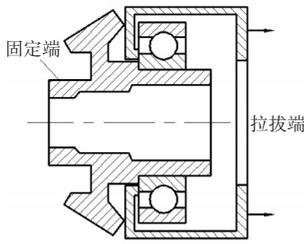


图 13 改进的拆卸试验形式 图 14 试验后轴承内圈内径表面形貌

试验结果表明,在齿轮轴装配过程中的直接拉拔导致轴承表面质量下降,严重时造成轴承工作表面的初始损伤。

## 5 结束语

根据故障件失效时序试验与轴承拆卸试验,完成该型轴承故障复现,定位该轴承失效原因为外圈沟道表面损伤,而造成轴承外圈沟道表面损伤的 1 个主要因素为轴承拆卸过程工艺不当。在轴承拆卸过程中,需采用轴承内圈拆卸工艺以减少轴承损伤风险。

### 参考文献:

- [1] 周志澜,马纯民.航空发动机主轴轴承失效分析与预防[M].北京:科学出版社,1998:133-136.  
ZHOU Zhilan, MA Chunmin. Analysis and prevention of spindle bearing fault in air transfer[J]. Beijing: Science Press, 1998: 133-136. (in Chinese)
- [2] 梁华,郭浩,王煜哲.滚动轴承接触疲劳失效的分析方法[J].轴承,2015(9):26-29.  
LIANG Hua, GUO Hao, WANG Yuzhe. Contact fatigue failure analysis of rolling bearings[J]. Bearing, 2015(9): 26-29. (in Chinese)
- [3] 谢荣华,罗贵火.航空用高速滚动轴承失效分析[J].振动与冲击,2008,27(5):131-134.  
XIE Ronghua, LUO Guihuo. Failure analysis of high speed rolling bearings for aviation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(5): 131-134. (in Chinese)
- [4] 拾益跃,胡栋.滚动轴承早期失效分析[J].轴承,2008(2):15-19.  
SHI Yiyue, HU Dong. Early failure analysis of rolling bearings[J]. Bearing, 2008(2): 15-19. (in Chinese)
- [5] 贺孝涛,叶新农.发动机轴承保持架铆钉脱落原因分析[J].失效分析与预防,2013,8(1):55-59.  
HE Xiaotao, YE Xinnong. Analysis of the causes of rivet detachment of engine bearing cage[J]. Failure Analysis and Prevention, 2013, 8(1): 55-59. (in Chinese)
- [6] 罗志刚,于庆杰,姜铁寅,等.某发动机机匣轴承沟道剥落及铆钉断裂故障分析[J].轴承,2018(7):46-47,52.  
LUO Zhigang, YU Qingjie, JIANG Tiejun, et al. Analysis on raceway flaking and rivet fracture fault of brake bearings for engine[J]. Bearing, 2018(7): 46-47, 52. (in Chinese)
- [7] 徐锐.航空发动机主轴球轴承失效分析[J].轴承,2011(6):20-24.  
XU Rui. Failure analysis of aero engine spindle ball bearing[J]. Bearing, 2011(6): 20-24. (in Chinese)
- [8] 黄晓辉.某深沟球轴承失效分析[J].哈尔滨轴承,2014,35(1):17-19.  
HUANG Xiaohui. Failure analysis of the deep groove ball bearing[J]. Journal of Harbin Bearing, 2014, 35(1): 17-19. (in Chinese)
- [9] 吴志平.深沟球轴承磨损失效分析[J].哈尔滨轴承,2015,36(1):19-21.  
WU Zhiping. Analysis on wear failure for deep groove ball bearing[J]. Journal of Harbin Bearing, 2015, 36(1): 19-21. (in Chinese)
- [10] 胡春燕,刘新灵,李莹.某发动机主燃油泵轴承失效分析[J].金属热处理,2011(1):755-759.  
HU Chunyan, LIU Xinling, LI Ying. Failure analysis of a main fuel pump bearing of an engine[J]. Metal Heat Treatment, 2011(1): 755-759. (in Chinese)
- [11] 班君,郑艳华,刘秀莲,等.航空发动机轴承剥落分析[J].失效分析与预防,2016,11(6):377-382.  
BAN Jun, ZHENG Yanhua, LIU Xiulian, et al. Spalling failure analysis of bearing in aero engine[J]. Failure Analysis and Prevention, 2016, 11(6): 377-382. (in Chinese)
- [12] 赵灵蓉,张书丽.深沟球轴承保持架铆钉断裂原因分析[J].哈尔滨轴承,2007,28(1):5-6.  
ZHAO Lingrong, ZHANG Shuli. Analyzing deep groove ball bearing cage rivet for fracture reason[J]. Journal of Harbin Bearing, 2007, 28(1): 5-6. (in Chinese)
- [13] 宋海荣,赵爱国,刘元春,等.某发动机轴承失效原因分析[J].失效分析与预防,2006,1(2):55-58.  
SONG Hairong, ZHAO Aiguo, LIU Yuanchun, et al. Failure analysis of bearing in aero engine[J]. Failure Analysis and Prevention, 2006, 1(2): 55-58. (in Chinese)
- [14] 陈宇,酆敏洁.航空发动机轴承失效分析[J].轴承,2007(5):22-25.  
CHEN Yu, FENG Minjie. Failure analysis of aero engine bearing[J]. Bearing, 2007(5): 22-25. (in Chinese)
- [15] 崔约贤,王长利.金属断口分析[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1998:76-92.  
CUI Yuexian, WANG Changli. Metal fracture analysis[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1998: 76-92. (in Chinese)

(编辑:刘静)