

航空发动机主轴轴承剥落扩展试验

胡铭鑫^{1,2}, 孔令成^{1,2}, 赵聪^{1,2}, 张浩^{1,2}, 毛宏图^{1,2}

(1. 中国航发沈阳发动机研究所; 2. 中国航发航空发动机动力传输重点实验室; 沈阳 110015)

摘要:为探索轴承的剥落极限,开展了航空发动机主轴轴承的剥落扩展试验研究。介绍了轴承损伤的形式以及国内外关于疲劳剥落损伤的研究现状;介绍了试验轴承的初始剥落状态以及试验器的基本情况,明确了轴承的润滑条件和监测方式;按照发动机的真实工况和载荷谱制定试验方案并开展试验,定期分解监控轴承的剥落扩展趋势;对试验过程中金属屑末质量分数、轴承温度以及转子振动的监测结果进行了分析。结果表明:小面积剥落的轴承在 18 h 试验时间内仍能继续工作,轴承温升未发生明显改变,轴承外圈温度大部分时间内保持在 150~190 °C,但金属屑末质量分数及转子振动时域幅值不断增大,金属屑末累计增长约 9500 个,振动时域幅值已超过 600g。各项参数的监测结果对发动机地面试车或飞行具有重要的参考价值。

关键词:航空发动机;主轴轴承;剥落扩展;试验研究;监测方式

中图分类号:V233.4

文献标识码:A

doi:10.13477/j.cnki.aeroengine.2024.01.017

Experimental for Spalling Propagation of Aeroengine Spindle Bearings

HU Ming-xin^{1,2}, KONG Ling-cheng^{1,2}, ZHAO Cong^{1,2}, ZHANG Hao^{1,2}, MAO Hong-tu^{1,2}

(1. AECC Shenyang Engine Research Institute;

2. AECC Key Laboratory of Power Transmission Technology on Aeroengine; Shenyang 110015, China)

Abstract: The spalling propagation experimental research for aeroengine spindle bearing has been developed in order to exploring the spalling limit of bearing. The form of bearing damage and the current research status on fatigue peeling damage both domestically and internationally have been introduced. The initial spalling state of the test bearing and the basic situation of the tester have been introduced. The lubrication condition and monitoring mode of the bearing have been defined. The test scheme has been formulated and developed according to the real working conditions and load spectrum of the engine. The tendency of spalling bearing has been monitored by periodic disassembly. The monitoring results of metal chip content, bearing temperature and rotor vibration during the test have been analyzed. The test results show that the bearing with small area peeling can continue working in the 18h of testing time, and the temperature rise is not be changed significantly, the temperature of the outer ring of the bearing remain at 150~190°C for most of time, but the content of metal chips and the time domain amplitude of rotor vibration are increasing, the growth of metal chips is about 9500 and the time domain amplitude of rotor vibration is about 600g. The monitoring results of various parameters have important reference value for subsequent engine ground test or flight.

Key words: aeroengine; spindle bearings; spalling propagation; experimental research; monitoring mode

0 引言

航空发动机是“支承在轴承上”的高速旋转热力机械,主轴轴承作为发动机转子系统的支承核心,对保证发动机的性能实现和可靠运转至关重要^[1]。国外航空发动机公司一直将轴承视为发动机的核心零部件,持续推进主轴轴承相关技术研发^[2-4],并严格控制其技术输出。

中国航空发动机主轴轴承的技术研发起步相对较晚,加之应用于发动机上的轴承具有高温、高速、高 DN 值、载荷变化区间大等特点^[5],工作条件极其恶劣,因此其故障率较高且损伤形式多种多样,主要包括表面损伤(腐蚀和锈蚀、打滑蹭伤、压痕和划伤、磨损等)、疲劳剥落、裂纹和断裂、尺寸变化等。虽然这些损伤产生的初期发动机还能维持正常运转,但最终不是发生抱轴就是因轴承间隙过大造成发动机各工作

收稿日期:2022-06-20 基金项目:航空动力基础科研项目资助

作者简介:胡铭鑫(1990),男,硕士,工程师。

引用格式:胡铭鑫,孔令成,赵聪,等.航空发动机主轴轴承剥落扩展试验[J].航空发动机,2024,50(1):124-128.HU Mingxin,KONG Lingcheng,ZHAO Cong,et al.Experimental for spalling propagation of aeroengine spindle bearings[J].Aeroengine,2024,50(1):124-128.

间隙发生严重磨损,使发动机产生严重的机械损坏,从而对其可靠性和安全性造成重大影响^[6-7]。

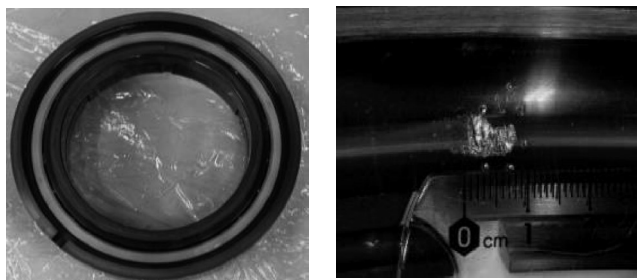
疲劳剥落是航空发动机轴承常见的损伤形式之一,尤其是工况较为恶劣的角接触球轴承和中介轴承,为此国内外学者进行了大量研究。王洪伟^[8]开发了离线油液磨粒检测技术和在线油液磨屑检测技术,研究了航空发动机滚动轴承故障诊断方法和寿命预测方法,并进行了实际工程应用和试验验证;刘远航等^[9]结合航空发动机轴承在使用中所出现的早期剥落进行分析,查找原因并采取针对性的措施来提高航空发动机轴承的使用质量和使用寿命;李青等^[10-11]、徐健^[12]针对轴承钢球的表面剥落及裂纹故障进行宏观和微观检查,明确了剥落故障原因,并建议优化磨削加工、表面清洗等工艺,严格控制钢球热处理工艺参数;刘静等^[13]研究了局部剥落故障对滚子与故障周边区域之间的接触特性以及轴承振动响应特征的影响规律;冯小川等^[14-16]分别从材料分析、振动分析和试验研究等方面给出轴承内圈、钢球及外圈剥落故障的原因。

本文选取发动机的1套已剥落的角接触球轴承进行剥落扩展试验,通过采用监测金属屑末含量、轴承温度、转子振动等手段,对其剥落扩展规律进行分析,探索轴承的剥落极限,从而为发动机地面试车或飞行试验提供重要的技术支持。

1 试验条件

1.1 试验轴承

试验轴承为已经在装机状态下使用500 h的3支点球接触球轴承,钢球数量为20个。分解后在轴承外圈中央滚动体接触区域预制缺陷,采用洛氏硬度仪手动压坑,压坑直径约为1 mm、数量为2×3个。随后轴承在试验器上运行了5 h后发生剥落,剥落范围约为8 mm×6 mm(长×宽),试验轴承初始状态如图1所示。



(a) 轴承全貌

(b) 初始状态

图1 试验轴承初始状态

从图中可见,轴承外观无明显异常,除剥落区域外,内外圈沟道内其他区域无磨损痕迹。转动轴承无明显卡滞,钢球均能顺利通过剥落区域。

1.2 试验器

试验轴承安装在高温高速轴承试验器上,配合关系为内圈过盈、外圈过渡。试验器转子由电主轴驱动运转,最高转速达17000 r/min,试验器主体如图2所示。

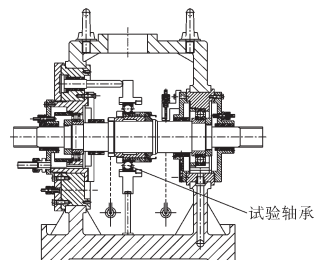


图2 试验器主体

试验轴承装配在试验器的转子中心,并拥有独立的腔室结构。轴承的润滑由试验润滑系统单独提供;所受径向载荷和轴向载荷均直接施加至轴承外圈,由液压加载系统提供;左右两侧为“一球一棒”2套支承轴承,其润滑由设备润滑系统提供。

2 试验方法

2.1 润滑方式

试验轴承使用符合国军标要求的航空润滑油进行润滑,润滑条件见表1。

2.2 监测方式

由于试验轴承初始状态存在疲劳剥落,试验过程中需密切关注滑油金属屑含量、轴承温度、转子振动变化等情况。因此,在试验润滑系统的回油管路、试验轴承外圈以及试验壳体靠近试验轴承处分别安装金属屑末传感器、温度传感器以及振动传感器进行实时监测,同时对涉及试验器性能的转速、供油压力、供回油温度、加载能力等指标进行辅助监测。

各监测参数的精度见表2。

在试验中,若发生下列情况之一时,需终止试验:

表2 监测参数精度

监测参数	测试范围	测试精度/%*
主体转速/(r/min)	0~15000	±1
供回油温度/°C	0~300	±0.5
轴承外圈温度/°C	0~300	±0.5
供油压力/MPa	0~1	±0.5
加载载荷/N	0~35000	±1
金属屑末外廓尺寸/μm	≥200	

注:测试精度的单位为传感器的指标相对于传感器的满量程误差的百分数,即%F.S。

表1 试验轴承润滑条件

润滑条件	指标要求
供油方式	环下+端面侧喷
供油温度/°C	120±10
供油压力/MPa	0.32~0.39
供油流量/(L/min)	10.0~11.3

- (1) 试验器转子发生抱轴时;
- (2) 试验轴承外圈温度超过 220 °C 时;
- (3) 试验器出现异常噪声,沿 x 、 y 、 z 3 个方向的振动均持续增大且无减缓趋势时;
- (4) 金属屑末增长率持续提高且无减缓或降低趋势,或增长量超过 10000 个时;
- (5) 试验器发生转子飞出、转静子异常碰摩或存在其他安全隐患时。

2.3 试验方案

本次试验模拟发动机的真实工况,按照发动机试车载荷谱循环运行了 18 h,并分解试验轴承 6 次,观察轴承外圈的剥落扩展情况,分别间隔 2、2、2、4、4、4 h。由于目前中国可借鉴的轴承剥落扩展试验研究相对较少,因此从安全性的角度出发,在试验的初期阶段增大了试验轴承分解的频次。

3 试验结果及分析

3.1 轴承的剥落扩展结果

按上述试验条件和方法进行试验,通过分解轴承,观察其外圈剥落扩展情况如图 3 所示,试验轴承剥落尺寸见表 3。

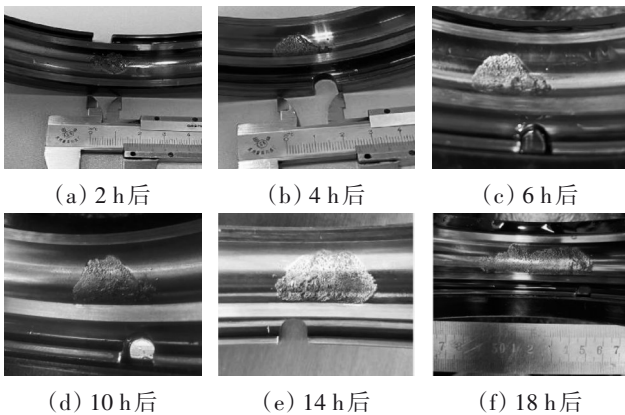


图 3 试验轴承剥落扩展结果

表 3 试验轴承剥落尺寸

试验阶段	剥落尺寸 (长×宽)/mm	试验阶段	剥落尺寸 (长×宽)/mm
2 h 后	15×12	10 h 后	25×20
4 h 后	23×17	14 h 后	31×20
6 h 后	25×17	18 h 后	70×20

此外,在 18 h 试验后分解轴承发现,共有 5 个滚动体的表面出现剥落,如图 4 所示。

由此可知,轴承的剥落扩展经历了快速期、平稳期、急速期 3 个阶段。其中,前 2 次试验(0~4 h)为快速剥落期,剥落区域沿轴承圆周和宽度方向快速扩

展;中间 3 次试验(4~14 h)为平稳剥落期,剥落区域沿轴承圆周、宽度、深度方向平稳扩展,且宽度基本已达上限;最后一次试验(14~18 h)为急速剥落期,剥落区域沿轴承圆周方向成倍扩展,且深度进一步增大,滚动体也出现了不同程度的疲劳剥落。

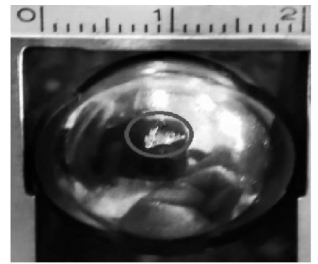


图 4 滚动体表面剥落

3.2 转速及加载系统监测结果

按发动机载荷谱开展试验,以轴承 2 次分解之间的某次试验为例,转速及加载系统监测结果分别如图 5、6 所示。

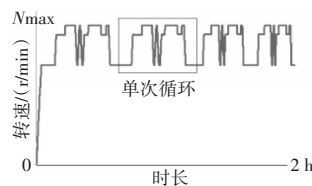


图 5 转速监测结果

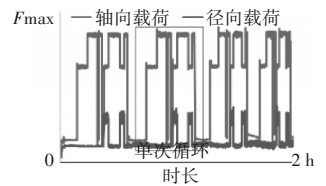


图 6 加载系统监测结果

3.3 金属屑末监测结果

金属屑末传感器位于试验润滑系统回油出口附近管路上,6 次试验的金属屑末增长量监测结果如图 7 所示并见表 4。

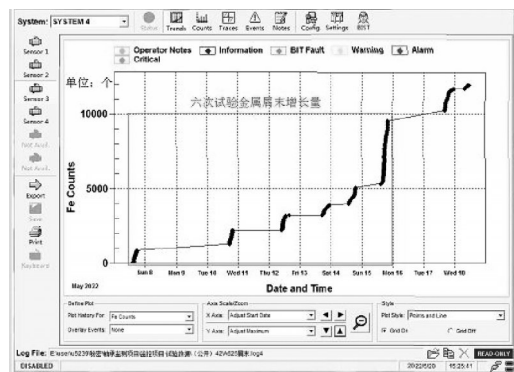


图 7 金属屑末增长量监测结果

表 4 金属屑末单次增长量

时间/h	剥落尺寸(长×宽)/(mm)		增长量/个
	试验前	试验后	
2	8×6	15×12	850 ~ 900
4	15×12	23×17	850 ~ 900
6	23×17	25×17	750 ~ 800
10	25×17	25×20	600 ~ 650
14	25×20	31×20	约 1000
18	31×20	70×20	约 4000

单次试验的金属屑末增长率监测结果如图 8 所示。

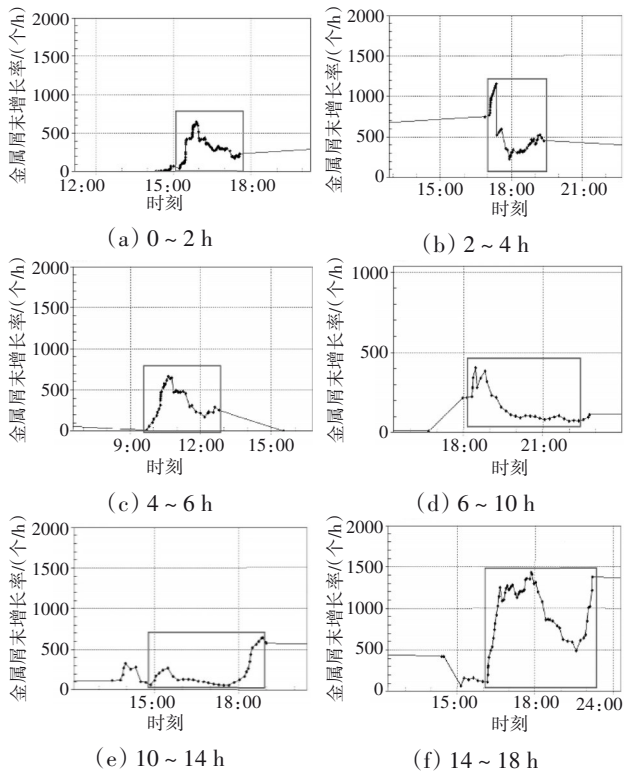


图 8 金属屑末增长率监测结果

由此可知,金属屑末增长总量约为 9500 个(含润滑系统自循环时的增长量)。其中,前 5 次试验的单次增长量差异不大,屑末增长主要集中在试验开始阶段,运行稳定后屑末增长趋于平缓。在进行最后一次试验时,屑末显著增长,单次增长量近似于前 5 次试验的总和。

3.4 轴承温度监测结果

在试验轴承外圈设置 2 处温度测点,实时监测轴承温度,结果如图 9 所示。

由此可知,试验轴承温度的变化趋势基本相同,且与运行工况有直接关系。轴承运行稳定后,温度基本保持在 150~190℃,随着轴承剥落区域的逐渐增大,轴承在大状态下的温度进一步升高,最高为 202℃。

3.5 转子振动监测结果

振动传感器位于试验器主体试验轴承附近的外壳体表面,可同时监测转子 x 、 y 、 z 3 个方向的振动情况,转子振动时域监测结果如图 10 所示。

根据轴承剥落前及剥落初期的振动监测结果可知,主体振动的时域幅值通常 $<3g$ 。由于本文的试验

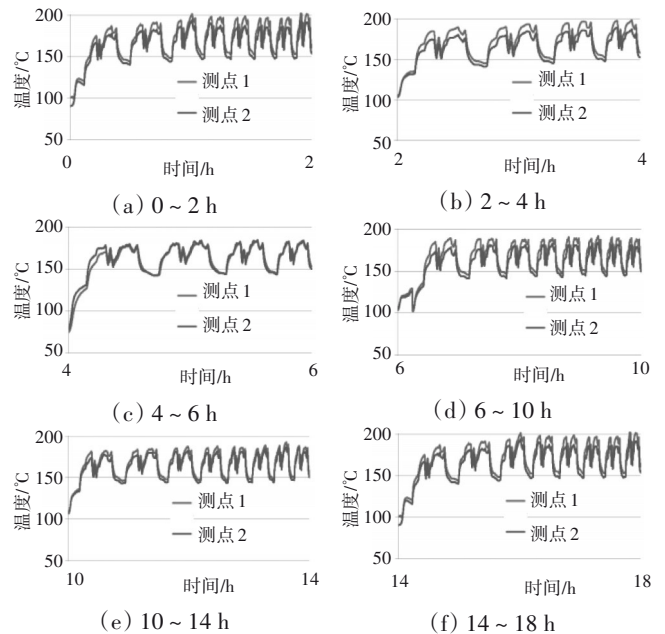


图 9 试验轴承温度监测结果

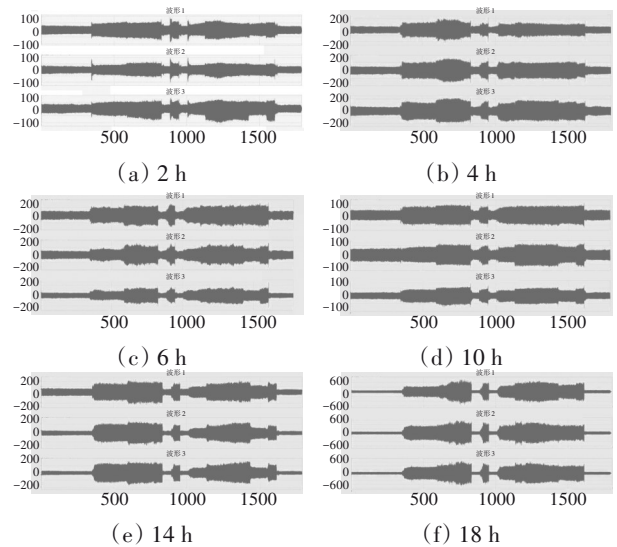


图 10 转子振动时域监测结果

轴承为已剥落轴承,主体振动相对较大。从图 10 中可见,试验进行 2 h 的时域最大幅值约为 $\pm 35g$;当试验分别进行 4、6、10 h 后的时域最大幅值约为 $\pm 150 \sim \pm 200g$,且幅值趋于平稳;随后幅值开始出现明显增长,且从单一方向的增长变为 3 方向共同增长,试验进行 14 h 的时域最大幅值达到约 $\pm 250g$;试验进行 18 h 的时域最大幅值已达到约 $\pm 620g$,分析认为轴承剥落已达到非常严重的程度。

4 结论

(1) 轴承试验件在出现疲劳剥落损伤后的一段时间内仍能继续工作,没有发生抱轴或更加严重的机械

损坏,故轴承温度并未显著提高。

(2)在试验进行至16~18 h期间时,轴承呈现急速剥落状态,金属屑末增长量、转子振动指标均进一步恶化,如果继续试验极易造成试验器损坏,并且轴承有可能出现更为严重的失效形式。由此推断经过18 h试验后,轴承已达到了剥落扩展极限。

(3)通过本次试验初步掌握了航空发动机主轴轴承在出现疲劳剥落损伤后的性能,以及在剥落扩展过程中各项监测指标的响应情况,由试验结果可知,对金属屑末含量的监测可用于直接判断轴承是否剥落;对转子振动特性的监测可用于分析轴承是否具有剥落趋势,起到预警作用,对后续发动机地面试车或飞行时轴承的状态监测具有重要的参考价值。

参考文献:

- [1] 高文君,吕亚国,刘振侠.航空发动机主轴轴承应用技术[M].北京:科学出版社,2021:1.
GAO Wenjun, LYU Yaguo, LIU Zhenxia. Application technology of aeroengine spindle bearing[M]. Beijing: Science Press, 2021: 1. (in Chinese)
- [2] Kallappa P, Byington C S, Kalgren P W, et al.
High frequency incipient fault detection for engine bearing components [R].ASME 2005-GT-68516.
- [3] Mohanty S, Gupta K, Raju K S.Comparative study between VMD and EMD in bearing fault diagnosis[C]//International Conference on Industrial and Information Systems. Gwalior:IEEE, 2015:1-6.
- [4] Vyas N S, Satishkumar D. Artificial neural network design for fault identification in a rotor-bearing system[J]. Mechanism and Machine Theory, 2001, 36(2): 157-175.
- [5] 孔德龙,林国昌.航空发动机主轴轴承主要损伤模式及原因分析[J].航空科学技术, 2011(5): 22-24.
KONG Delong, LIN Guochang. Major damage mode and analysis of main shaft bearings of aeroengine[J]. Aviation Science and Technology, 2011(5): 22-24. (in Chinese)
- [6] 陈超,曾昭洋,罗军,等.航空发动机主轴轴承失效模式分析[J].润滑与密封, 2020, 45(3): 126-131.
CHEN Chao, ZENG Zhaoyang, LUO Jun, et al. Failure mode analysis of aeroengine spindle bearings [J]. Lubrication Engineering, 2020, 45(3): 126-131. (in Chinese)
- [7] 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)
- [8] HEMMATI F, ALQARADAWI M, GADALA M S. Rolling element bearing fault diagnostics using acoustic emission technique and advanced signal processing[J]. Journal of Engineering Tribology, 2016, 23(1): 64-77.
- [9] AMINI A, ENTEZAMI M, PAPAELIAS M. Onboard detection of railway axle bearing defects using envelope analysis of high frequency acoustic emission signals[J]. Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation, 2016, 6: 8-16.
- [10] 王洪伟.航空发动机滚动轴承故障诊断与预测关键技术研究[D].南京:南京航空航天大学, 2015.
WANG Hongwei. Research on key techniques of fault diagnosis for aeroengine rolling bearing[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015. (in Chinese)
- [11] 刘远航,巩孟祥,郑丽,等.某型号航空发动机轴承疲劳剥落缺陷分析[J].中国新技术新产品, 2018(21): 64-65.
LIU Yuanhang, GONG Mengxiang, ZHENG Li, et al. Analysis of fatigue peeling defects in bearing of aircraft engine[J]. New Technology & New Products of China, 2018(21): 64-65. (in Chinese)
- [12] 李青,佟文伟,张开阔,等.某航空发动机轴承钢球失效分析[J].航空发动机, 2015, 41(3): 93-96.
LI Qing, TONG Wenwei, ZHANG Kaikuo, et al. Failure analysis of steel ball in bearing for an aeroengine[J]. Aeroengine, 2015, 41(3): 93-96. (in Chinese)
- [13] 李青,杨纯辉,佟文伟,等.航空发动机球轴承外圈剥落机理分析[J].航空发动机, 2020, 46(5): 10-13.
LI Qing, YANG Chunhui, TONG Wenwei, et al. Spalling mechanism analysis on outer ring of aeroengine ball bearing[J]. Aeroengine, 2020, 46(5): 10-13. (in Chinese)
- [14] 徐健.航空发动机轴承滚道剥落故障研究[J].机械工程师, 2014(2): 202-203.
XU Jian. Spalling failure analysis of aeroengine bearing raceway[J]. Mechanical Engineer, 2014(2): 202-203. (in Chinese)
- [15] 刘静,唐昌柯,师志峰,等.局部剥落故障对滚动轴承接触与振动特性的影响[J].中南大学学报, 2019, 50(10): 2417-2424.
LIU Jing, TANG Changke, SHI Zhifeng, et al. Influence of localized spalling defect in roller bearing on contact characteristics and vibrations[J]. Journal of Central South University, 2019, 50(10): 2417-2424. (in Chinese)
- [16] 冯小川,刘旭东,刘森.航空发动机低压轴前支点轴承内圈剥落故障分析[J].失效分析与预防, 2017, 12(2): 121-125.
FENG Xiaochuan, LIU Xudong, LIU Sen. Failure analysis on peeling off of inner ring of front bearing of aeroengine low-pressure shaft[J]. Failure Analysis and Prevention, 2017, 12(2): 121-125. (in Chinese)
- [17] 徐雷,张廷勇,葛泉江.某型发动机主轴轴承钢球表面剥落分析[J].哈尔滨轴承, 2018, 39(3): 13-14.
XU Lei, ZHANG Tingyong, GE Quanjiang. Analysis of surfacial spalling of steel ball in an engine spindle bearing [J]. Journal of Harbin Bearing, 2018, 39(3): 13-14. (in Chinese)
- [18] 孙守保,郭瑜,伍星.基于声发射信号的滚动轴承外圈疲劳剥落故障双冲击特征提取[J].振动与冲击, 2017, 36(4): 1-6.
SUN Shoubao, GUO Yu, WU Xing. Double impulse phenomenon extraction of outer race spalled rolling element bearings based on acoustic emission signals[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(4): 1-6. (in Chinese)

(编辑: 刘静)