

航空发动机主轴轴承主要损伤模式及原因分析

Major Damage Mode and Analysis of Main Shaft Bearings of Aeroengine

孔德龙 林国昌 / 航空发动机动力传输航空科技重点实验室

摘要:列举了航空发动机主轴轴承常见的主要损伤模式,对损伤模式的形貌特征进行了描述,并分析了形成损伤的机理及可能造成的危害,提出了预防措施。

关键词: 主轴轴承; 损伤; 原因分析

Keywords: main shaft bearing; damage; analysis

0 引言

主轴轴承是航空发动机的关键部件,其可靠性至关重要。发动机主轴轴承质量的好坏,是影响发动机寿命和可靠性的重要因素之一。由于其工作条件具有高温、高速、高DN值、载荷变化区间大等特点,与其他轴承相比工作条件极为恶劣,所以其故障率较高且损伤模式多种多样。

1 主要损伤模式及其产生原因

1.1 剥落

由于应力场内疲劳裂纹的扩展导致的金属微粒脱落,形成肉眼可见的弧坑被称为剥落。图1所示为一典型的轴承元件剥落形貌。剥落是发动机主轴轴承最常见的故障模式,按剥落的起因分为次表面疲劳剥落和表面损伤引起的剥落。

在轴承滚道或滚动体应力集中部位的次表面,由于材料微观撕裂引起的疲劳剥落就是次表面疲劳剥落,这是由于滚动体在滚道上挤压滚动时,在次表面上形成的与表面倾斜约45°的最大正交剪切拉应力造成的,其影响因素主要是载荷大小、作用次数和次表面的残余应力状态。随着材料、工艺等方面的改善,正常工作条件下短

期内轴承很难发生次表面疲劳剥落。但在某些特殊工况下,如温度场变化使轴承径向产生较大负工作游隙或轴承内外圈严重倾斜,最大赫兹应力达到一定值时就会在短期内发生次表面疲劳剥落。

表面损伤引起的剥落,多是由工作表面存在的压延印痕、划痕、打滑蹭伤、异物损伤、腐蚀等导致的表面缺陷部位的微观裂纹扩展造成的以鳞剥形式开始的剥落。该种剥落不需要很大的应力水平和很多的作用次数。

轴承出现剥落后,引起发动机振动,加大噪声,严重者导致轴承功能丧失,对发动机的使用安全构成威胁。

在选用合适轴承材料的前提下,将材料表面和次表面残余拉应力改变为压应力以及预防表面损伤,是防止轴承剥落的最有效方法。

1.2 微粒引起的损伤

一些金属的、无机的或植物性的大小不等的微粒,粘连或嵌夹在轴承的一些部位上会留下印痕,如图2所示。

根据美国麻省理工学院和GE公司联合对外场发动机拆下的200套轴承分析的结果,微粒引起的损伤是外场发动机主轴

轴承最普遍的失效方式。

产生微粒损伤的主要原因是滑油污染,污染源主要来自密封跑道涂层上刮掉的碎屑、封严气体带人的沙尘等硬质颗粒及轴承元件磨损或剥落后的产物。

微粒引起损伤的影响主要包括:1)大幅增加的表面粗糙度使轴承工作面产生微观裂纹,并使油膜遭受严重破坏,从而大幅降低轴承



图1 球轴承套圈上发生剥落损伤



图2 轴承元件上由微粒留下的印痕

寿命;2) 降低了工作面精度,影响载荷分布的均匀性和滚动体的运动姿态,从而引起轴承非正常损坏;3) 增加了保持架负荷,甚至引发保持架振动,造成保持架损坏。

1.3 压延印痕

压延印痕是发生在轴承元件表面的塑性变形印痕,有直线状的或圆形的,方向随机。这是轴承运转时微粒在轴承元件间通过而造成的。印痕的底部一般与轴承元件的表面相同。图3所示为一典型的轴承元件压延印痕形貌。

如果滑油中含有硬质颗粒,不仅可以造成磨粒损伤,还可能会造成滚动体和滚道表面的压痕。此外,装配与拆卸轴承、整机及其部件工作或运输中的过度冲击都有可能造



图3 发动机滚子轴承滚动体上的压延印痕

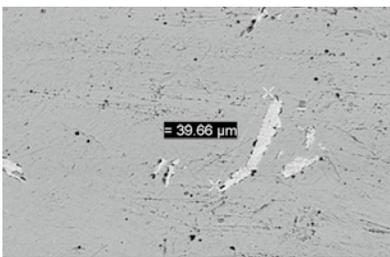


图4 轴承套圈上的碳化物形貌



图5 发动机轴承套圈轻载打滑痕迹

成滚道或滚动体表面的压痕。

出现压延印痕,会增大轴承的噪声,并且在印痕边缘产生超应力(即边缘效应),从而成为疲劳剥落的起始点,还可能使轴承游隙消失,旋转时卡死。

1.4 工作面或次表面的夹杂物引起的损伤

图4所示为轴承套圈上的碳化物形貌。由于碳化物、氧化物等夹杂物的韧性差,并且与周围基体材料之间形成分明的界面,当其尺寸较大且存在于轴承工作面与次表面之间时,受到挤压后容易碎裂,其周围边缘若干凹沟处受到两边凸出材料的频繁挤压与松弛很容易产生疲劳裂纹,从而成为剥落起始点。

控制碳化物、氧化物等夹杂物,需通过选用优质的轴承材料,优化材料的冶炼工艺和锻造工艺来实现。

1.5 打滑蹭伤

打滑蹭伤是细微磨损的一种特殊形式,由于轴承转速高、载荷轻,滚动件/滚道接触面在旋转时的强烈滑动而引起的。打滑蹭伤表现特征为印痕端部呈火花状。图5是一典型的轴承套圈打滑蹭伤痕迹。

打滑蹭伤是航空发动机主轴滚子轴承常见的故障,在球轴承上也时有发生。滚子轴承打滑蹭伤的主要原因是转子重量较轻,对轴承没有形成足够的径向载荷;球轴承打滑蹭伤的主要原因是所受轴向载荷变向。此外,滚动体和保持架所受的运动阻力过大时也会发生打滑蹭伤故障。

轴承的打滑蹭伤导致轴承元件几何尺寸改变,进而引起振动和噪声;轴承内



图6 发动机轴承保持架引导面磨损形貌

部游隙增大,降低轴承寿命;保持架发脆甚至断裂。

可以通过减少滚动体数量和尺寸、减轻保持架的重量、采用非圆套圈、减小径向游隙及增加预负荷等方法避免轴承出现打滑蹭伤。

1.6 引导面和非工作面磨损

处在临界润滑状态下,两个相互接触的物体相对运动时将产生表面损伤,如果这个过程持续不断地进行下去,损伤的扩大将引起表面剥蚀,从而造成工作面材料的逐渐损失,这种现象称为磨损。图6是发动机轴承保持架引导面的磨损形貌。

轴承在装配不当、保持架共振、转速过高等特殊工况条件下很可能发生零件磨损。配合过松且压紧螺帽未压紧时,套圈配合面会产生相对转动,从而造成配合面磨损;保持架与引导套圈产生共振时,会造成保持架引导面和套圈引导面的严重磨损;转速过高或内外圈反转的滚子轴承很容易造成滚子端面磨损。

这些磨损轻则破坏轴承精度,重则在短期内造成轴承失效,应在设计中防止此类故障的发生。

1.7 接触腐蚀

接触腐蚀是发生在配合界面上的材料表面磨损,即发生在轴承的内孔、外径和端面上。微粒脱落并使接触表面氧化而形成黑红色附着层,覆盖了部分或全部配合界面。图7所示是接触腐蚀的典型形貌。

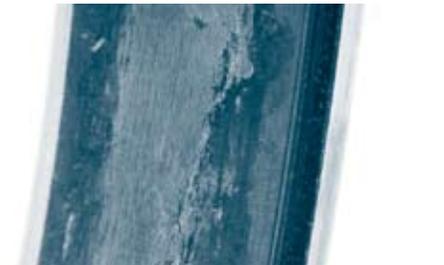


图7 轴承套圈上的接触腐蚀

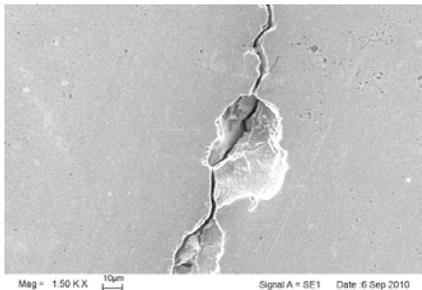


图8 涡轮轴发动机的滚子轴承外套圈断裂

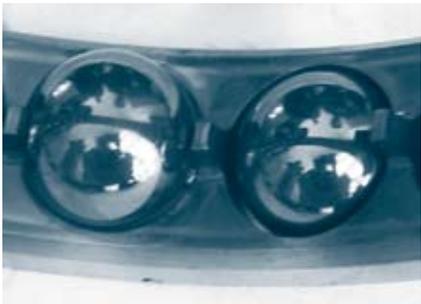


图9 发动机球轴承变色

在使用过程中,轴承配合面、工作面经常发生接触腐蚀,主要是由于工作状态配合面松动以及配合面滞留了盐分(Cl^- 等)和水分(可分解出 O^{2-})造成的,盐分主要来源于操作人员的徒手触摸。另外,异常振动和超负荷也可能造成接触腐蚀。

接触腐蚀对轴承工作产生的影响主要包括配合界面磨损,进而造成紧度消失;散播腐蚀性微粒,污染润滑系统;出现显微裂纹,导致疲劳裂纹扩展,严重者导致套圈断裂。

通过提高轴承配合界面紧度、避免外来污染和降低轴承负荷,可以有效防止接触腐蚀的出现。

1.8 断裂

断裂是在某个元件上由于裂纹向应力区域外扩展而导致的材料分离现象。图8所示为滚子轴承外套圈断裂形貌。

正常工况下,保持架所受的载荷很小,有几十倍载荷的强度储备。但当出现滚动体损坏、轴承断油、保持架异常振动、内外圈严重倾斜、双半套圈不对

正等异常状况时,保持架所受的载荷迅速加大,强度储备可能全部消失,进而造成保持架断裂。

套圈断裂主要是在高DN值旋转时,由于高碳高强度轴承钢的断裂韧性差造成的,其中结构上存在的应力集中因素和材料的缺陷部位多成为断裂的起始点,内圈采用过大的过盈配合也可能引起断裂。

轴承出现断裂损伤会导致大量材料分离,轴承元件损坏,功能丧失。

通过选用高韧性材料、减少撞击、采用适宜的配合紧度,可以避免轴承元件出现断裂。

1.9 轴承元件尺寸不稳定

轴承元件在热处理过程中,保留了一定数量的残余奥氏体,它属于一种不稳定的相,随着温度变化和时间的推移,将逐渐转变成一种较稳定的相—马氏体,这一转变过程中还伴随着体积的改变,从而改变了轴承元件的尺寸;另外,磨削加工过程造成的零件表面残余应力的逐渐释放也会改变零件的尺寸。

零件尺寸的变化造成轴承的制造精度、滚动体尺寸组差以及轴承游隙的改变,从而影响轴承的可靠性。

轴承零件在热处理过程中,应尽量使奥氏体转变为马氏体,将残余奥氏体的含量控制在一个较低的水平,轴承零件在精加工前应进行充分的时效处理,从而有效减小轴承元件尺寸的不稳定性。

1.10 变色

变色即轴承原始颜色的全部或局部发生变化。轴承工作一段时间后,轴承的表面会出现浅褐色沉积物或成为灰黑色表面,失去了原有的金属光泽。如果工作温度超过回火温度,还会出现零件材料金相组织的转变。图9为发动机球轴承的变色形貌。

轴承变色的原因主要包括,工作环境温度偏高,附着在轴承表面的油膜产生氧化现象,形成一种浅褐色的氧化膜产物,沉积附着在轴承的表面上;润滑剂不合适;轴承与某些化学产品接触而引起局部反应。

变色可能导致轴承的力学性能改变,甚至报废。

避免轴承与某些化学产品接触、降低轴承的工作温度可以有效防止轴承变色。

2 总结

综上所述,发动机主轴轴承的损伤模式主要有剥落、微粒引起的损伤、压延印痕、工作表面或次表面夹杂物引起的损伤、打滑蹭伤、引导面和非工作面磨损、接触腐蚀、断裂、轴承元件尺寸不稳定及变色等。各种损伤模式的产生机理各不相同,对轴承的危害程度也轻重不一,在实际应用过程中应仔细辨别、准确判断,采取有效措施,以防止可能导致严重后果的突发事故和意外损坏的发生。

AST

参考文献

- [1] Harris T A, Kotzalas M N. 滚动轴承分析[M]. 罗继伟,等,译. 北京:机械工业出版社,2010.
- [2] 万长森. 滚动轴承的分析方法[M]. 北京:机械工业出版社,1987.
- [3] 周志澜,马纯民,等. 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.

作者简介

孔德龙,高级工程师,硕士,主要从事航空发动机主轴轴承技术研究。

林国昌,研究员,主要从事航空发动机主轴轴承技术研究。