

文章编号: 1008-1542(2008)04-0308-05

# 苛刻工况下的反常磨损失效行为

李文忠, 张付祥

(河北科技大学机械电子工程学院, 河北石家庄 050018)

**摘要:**总结了在苛刻工况下的磨损量与摩擦副硬度成正比的反常磨损失效行为,分析了某涡喷发动机用主轴轴承的保持架与套圈的相对运动以及两者材料的机械性能,认为在高频冲击、高速滑动的耦合作用下,由于套圈的材料硬度高、塑性韧性差,容易产生微裂纹,同时润滑油在高温下对材料的化学作用加强,导致严重的反常磨损失效。

**关键词:**反常磨损;冲击滑动;苛刻工况;高速轴承

中图分类号: TH 117.1 文献标识码: A

## Abnormal wear failure behavior under rigorous working conditions

LI Wen-zhong, ZHANG Fu-xiang

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang Hebei 050018, China)

**Abstract:** Some kinds of failure resulted from abnormal wear under rigorous working conditions were summarized. Its wear volume is direct ratio to hardness of friction pairs. Relative movement between retainer and rings of the mainshaft bearing of turbojet engine and the mechanical performance of their material were analyzed. The friction pairs operate at the coupling action of high-frequency impact and high-speed sliding. The hardness of rings is higher and its plasticity is worse, which causes micro-crack easily. And chemistry of lube can be reinforced to material at high-temperature. The synthetical action results in abnormal wear.

**Key words:** abnormal wear; impact and sliding; rigorous working condition; high-speed bearing

磨损总是发生在零件的表面上,导致机械零件轮廓尺寸发生变化,使零件丧失精度、缩短寿命,使机械系统振动加剧、污染润滑系统,大幅度降低系统的可靠性,甚至导致严重事故。按照磨损的本质,摩擦学界通常将磨损分为粘着磨损、磨粒磨损、疲劳磨损、腐蚀磨损等。在不同的摩擦条件下,势必会造成不同的磨损机制,从而引起多种多样的磨损形式。

在工业领域中,磨粒磨损是最重要的一种磨损类型,约占 50%。研究表明,零件的磨损量通常会随着硬度的增加而减少。但是,随着高速、重载、高低温、高频振动等环境在航空、航天、国防领域的出现越来越频繁,摩擦副的工作条件日益苛刻,出现在密封、轴承、齿轮等摩擦副中的磨损形式越来越多,有些情况下材料的磨损量与摩擦副材料硬度之间的关系不再成正比,而是成反比,违反了常规,即发生了反常磨损。目前这类工况大都存在于航空、航天、国防等领域和民品高端产品领域,解决这类磨损失效已经迫在眉睫。由于领域重大,后果十分严重,既有摩擦学理论问题,又有摩擦学应用技术问题,而且采用传统的方法无法解决这类反常磨损失效,因此研究苛刻工况下的反常磨损的机理及解决途径具有重大的现实意义。

收稿日期: 2008-09-01; 责任编辑: 冯 民

作者简介: 李文忠(1976),男,河北蠡县人,博士研究生,主要从事摩擦学及其测试控制技术方面的研究。

# 1 几种典型的反常磨损行为

## 1.1 高速滚动轴承保持架引导面的反常磨损失效<sup>[1]</sup>

某小型高速涡喷发动机用主轴轴承的工作条件为高速(30 000 r/min)、高温(150~180 °C)、重载(表面接触应力 2.3 GPa)、高振动环境(发动机整体振动加速度 10g 以上),结构按典型的航空轴承设计。研究发现在这种特定的工况下,发动机工作 8~10 h 后,较软的保持架(HRC 为 33~37)引导面磨损相对较轻,而淬硬的轴承钢套圈(HRC 为 60~64)磨损相对严重,导致保持架与套圈径向间隙增大,振动急剧增大,使轴承失效,这是该轴承的一种典型失效形式,见图 1。

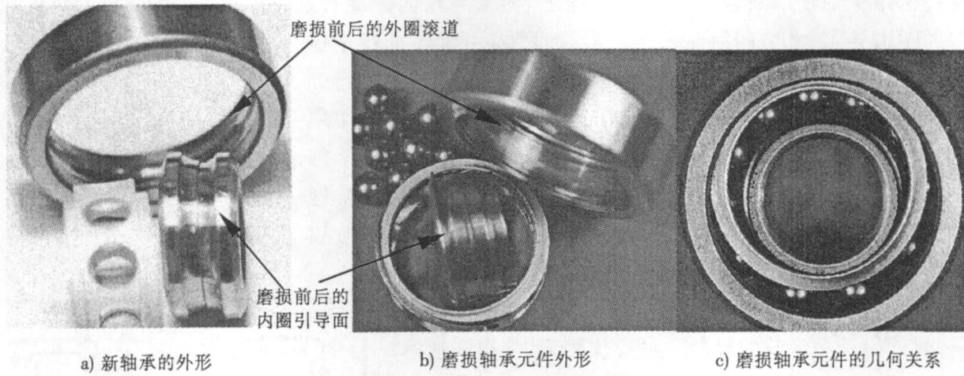


图 1 主轴轴承引导面严重反常磨损

Fig. 1 Abnormal severe wear on the guiding lands of a mainshaft bearing

## 1.2 高速机械动密封的反常磨损失效

图 2 所示为某超高速机械间隙密封中的反常磨损情况。配对的摩擦副材料分别是较硬的钛合金和较软的铜合金,通过二者之间的间隙作用密封高压低粘度低温液体。这对密封件的相对运动线速度高达 550 m/s,介质温度低于-150 °C。理论上二者之间不接触,但由于轴系变形,经常导致二者的轻微接触并发生摩擦,导致零件严重磨损,致使密封间隙增大,最终导致密封失效。其磨损的反常之处是硬度较高的钛合金旋转件表面磨损非常严重,形成很深的与铜合金静止件宽度相近的磨损痕迹,而硬度较低的铜合金环表面磨损十分轻微。

图 3 是另一类工作在二阶临界转速以上的高速接触式密封,配对的摩擦副材料为增强石墨对不锈钢 2Cr13,接触面平均线速度为 150~170 m/s,密封件两侧压差在 2 MPa 左右,密封介质为油和气体。在使用过程中,发生了严重的反常磨损失效,硬度较高的不锈钢零件端面被严重磨损,导致密封失效,产生泄漏。

## 1.3 精密磨床导轨的反常磨损失效

在民用工业领域,随着制造装备向高速、高效、高精度和大规模自动化、智能化方向发展,新的反常磨损成为影响装备精度寿命的一个因素。图 4 是精密磨床的高频震荡导轨,它的刚度、精度和精度寿命是高性能磨床的核心指标。目前的滚动体主要采用轴承钢淬火元件,硬度较高,导轨基面硬度较低,但即使如此,由于滚动体过早磨损,精度寿命不超过 2 a,严重制约着制造装备技术的提高。

此外, NASA 和欧洲太空局在开发天地往返运输系统(Space Shuttle)或新型运载工具过程中,都遇到了某些极端苛刻条件下的反常磨损失效,展开了艰苦的研究<sup>[2,3]</sup>。在一些钢与有机物配对的摩擦实验研究中也发现了硬度较高的钢的磨损量比较大的反常磨损现象<sup>[4]</sup>。

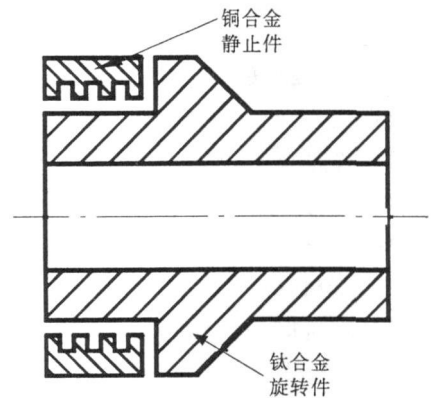


图 2 超高速间隙密封

Fig. 2 Ultra-high speed non-contact sealing faces

## 2 反常磨损失效行为的运动及机理分析

### 2.1 发生反常磨损的摩擦副的运动分析

研究摩擦与磨损,本质上就是研究在相对运动过程中接触界面上发生的物理和化学过程。材料的磨损受到摩擦学系统的接触条件、工况、环境、介质等多方面因素的影响。要对反常磨损的机理进行研究,首先要研究发生这种反常磨损时,摩擦副之间的相对运动及其受力状态。这里以涡喷发动机用轴承中出现的反常磨损为例进行分析。

涡喷发动机用主轴轴承安装方式为外圈固定,内圈与轴同速旋转,保持架依靠内圈引导,二者之间存在很小的径向间隙,由于轴承转速很高,在保持架与内圈引导面之间存在着很高的滑动速度。在轴承工作过程中,保持架与球不断发生作用,且在一周的运转中与前后过梁的作用交替进行,在一定的区域内球推保持架,而在另一部分区域内保持架推球,再加上由于滚动产生的球对保持架的摩擦力也是向同一方向的,这样就将保持架推向一侧,使保持架处于偏心状态。为了与各球对保持架的作用力平衡,套圈会对保持架产生反作用力。当球与保持架间的载荷具有冲击性质时,保持架对滚道一侧的力也可能具有冲击的性质;此外由于润滑油的喷射飞溅反作用力,使得高速运转的保持架受力失衡而加剧了运转不稳定<sup>[5]</sup>,由此产生保持架与内圈引导面间的碰撞作用。另外,发动机本身处于振动环境,整体振动10 g以上,外部振动载荷会突然改变轴承内部载荷的分布,保持架瞬时失去平衡,有可能导致保持架与套圈引导面间的载荷的急剧增大,产生振动,从而在保持架和套圈引导面中产生较大的动载荷和应力<sup>[6]</sup>。这样,在高速运转过程中,由于保持架不平衡和喷油反推力作用,在保持架与轴承内圈引导面之间存在高频冲击、高速滑动,瞬间完成能量传递,导致磨损破坏。在内圈引导面磨损导致间隙增大后,保持架会与外圈接触,重复与内圈相同的磨损过程。

通过对前面阐述的几种反常磨损现象的运动分析,发现其共同点是摩擦副的相对运动状态为伴有高频冲击的高速滑动。

### 2.2 反常磨损机理分析

上述分析表明,产生反常磨损是由于接触面之间存在着高频冲击和高速滑动,而摩擦副在反复冲击和高速摩擦作用下快速磨损。摩擦副间的运动状态是冲击和滑动的耦合,但产生反常磨损的机理并不是滑动磨损和冲击磨损的简单叠加,而是两种磨损耦合后的共同作用,在这一过程中还要充分考虑温度、润滑油等环境因素对磨损的影响。

#### 2.2.1 冲击滑动磨损作用

磨损可以认为是一个表面和亚表面材料的塑性变形与断裂的过程,一般应包括有塑性变形的局部积累、磨损裂纹形成及扩展、合并,直至材料分离等过程。

在滑动摩擦过程中,主要磨损形式为磨料磨损、粘着磨损和疲劳磨损。对于塑性材料,磨料磨损是由塑性变形机制引起的犁沟或微观切削;而对于脆性材料,断裂韧性与硬度比值较低,是由断裂机制引起的材料去除,材料损失率较大。材料的内部组织会影响其耐磨性,如奥氏体、贝氏体的抗磨料磨损优于珠光体和马氏体,夹杂物和内部缺陷会使其在磨损过程中更易产生剥落、开裂,因而大大降低耐磨性。而高碳马氏体中有较大的淬火应力和显微缺陷,脆性较大,对耐粘着磨损不利。虽然原始组织对耐磨性有一定影响,但更重要的是它们在动态磨损中的行为,如在许多情况下高硬度的介稳组织耐磨性不如低硬度的稳定组织好。疲劳磨损是材料在循环应力作用下表面层裂纹萌生、扩展、断裂剥落的过程。一般情况下,纯滚动或滚滑接触的零件为接触疲劳磨损,典型特征为点蚀和剥落,裂纹的萌生是主导过程,因此材料硬度越高,裂纹越难于萌

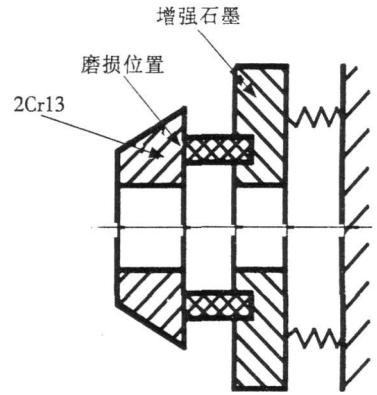


图3 高速接触式密封  
Fig.3 High-speed contact sealing

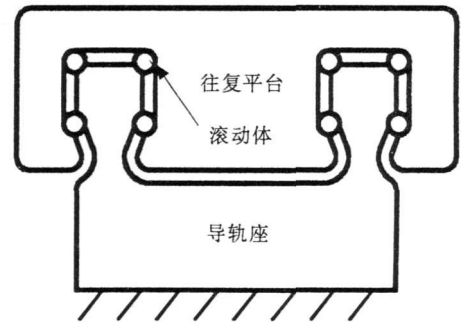


图4 高频震荡伺服滚动导轨  
Fig.4 High-frequency reciprocating

生,疲劳磨损寿命也越长;而在油润滑条件下,滑动疲劳磨损可能导致剥层和擦伤,其中疲劳裂纹的扩展阶段是影响疲劳寿命的主要因素,硬度越高,裂纹扩展速率越快,而且较高的材料硬度,还会形成较高的摩擦温度,导致疲劳裂纹的加速扩展。

在冲击作用下,材料表面的力学状态等因素发生变化,因此必须考虑冲击对磨损的影响。在磨损失效的类型中,冲击磨损可能是对材料最不利又了解最少的一类磨损。冲击磨损中最常见的作用机制是,在塑性材料中是亚表面中的裂纹形成及扩展,而在脆性材料中则主要是表面裂纹的形成及扩展。在冲击载荷作用下,磨损表面一般出现切削和凿削特征,同时冲击引起的高应力状态会导致磨损表面产生加工硬化,从而形成表面裂纹,裂纹的连接和扩展意味着材料将发生严重失效,且随着冲击能量的增加,其失效问题更加严重。

杨业元等对高硬度金属材料的研究表明<sup>[7]</sup>,冲击磨损表层形成2个区域:白层,形变层。白层其实是冲击表面的强烈变形层,白层导致材料失效。与材料的切削磨损相比,白层的剥落加剧了材料的磨损。

杨书申等通过对T10钢进行脉动冲击磨损试验及滑动磨损试验发现<sup>[8]</sup>:脉动冲击磨损机理既有冲击磨损所具有的塑性变形,又兼有滑动磨损特征,而高碳钢淬火时容易在马氏体内部形成显微裂纹,这种先天性缺陷使高碳马氏体附加了脆性,在高脉冲载荷反复作用下,这些微裂纹可能迅速扩展,并且相互连通扩展,最后导致材料的疲劳剥落。

OOTANI等研究了JIS SUH3钢与烧结合金摩擦副,发现<sup>[9]</sup>:纯冲击磨损的磨损量相对于伴随滑动的冲击很小;在室温下,随着滑动速度的增加,磨损量也随之增加。在400℃时,SUH3钢的硬度比烧结合金的略低,但烧结合金的磨损量比SUH3钢的高。分析认为,这是因为烧结合金的抗拉强度比SUH3钢的低,即脆性大的材料抗磨性更差。

因此,由于涡喷发动机用轴承中的保持架材料为40CrNiMo调质处理,合金中加入了Mo元素,硬度较低(HRC为33~37),断裂韧性较好,抗冲击磨损能力得到了提高;而套圈材料9Cr18为高铬高碳钢,淬火处理,硬度高(HRC为60~64),内部组织为高碳马氏体,有较大的淬火应力和显微缺陷,断裂韧性较差,抗粘着、疲劳以及冲击磨损的能力较低。在高频冲击、高速滑动摩擦的联合作用下,淬硬的套圈表面将更容易出现微裂纹并扩散,导致磨损较严重,而较软的保持架磨损较轻。

## 2.2.2 化学作用

在苛刻工况下研究材料的反常磨损行为时,化学作用在其中的影响也是必须考虑的一个重要因素。对于相对运动的2个表面,无论采取什么润滑措施,只要发生接触便会因摩擦而损失能量,伴生的现象则是表面温度的升高。在高温作用下,润滑油对摩擦材料的化学作用增强,使腐蚀磨损加重;同时还会变质分解出氢,从而对摩擦副产生氢致磨损。氢致磨损机制有2种:当氢含量较低时,是塑性犁削机制,而氢含量较高时,形成的金属氢化物导致材料在剪应力作用下呈现脆性剥落行为。

IMRAN等研究AISI 52100轴承钢和镀银钢在摩擦-机械作用下氢的扩散现象认为<sup>[10]</sup>,工作表面的摩擦化学和机械作用是产生氢的原因。氢的扩散和作用分为3个阶段:首先,氢吸附在浅表层区域的配合面,在边界润滑状态下与载荷共同作用减小摩擦系数,第2阶段,氢扩散至更深表层,与接触应力共同作用导致氢脆,第3阶段,氢与拉伸应力共同作用破坏轴承钢,最终导致失效。研究还发现,氢在试件中的扩散是不均匀的,而氢含量与循环应力次数的增加是有关系的。

张天成等研究Ti6Al4V合金氢致脆性磨损机制发现<sup>[11]</sup>:摩擦将诱导氢在磨损表面的富集,使材料流失所消耗的能量降低,从而使剪应力作用下的表面裂纹更容易形成和扩展;氢使Ti6Al4V合金的比能耗降低,氢含量较低时合金的动态硬度降低,氢含量高时合金的动态硬度升高,这与金属氢化物的生成有关。

涡喷发动机中主轴轴承采用油润滑,工作温度较高(150~180℃),同时保持架与套圈引导面在高频冲击、高速滑动摩擦下引起温度的升高会导致润滑油对钢的腐蚀加重,同时润滑油变质,析出氢,氢极易进入套圈引导面表层因高频冲击、高速滑动而出现的微裂纹中。氢在套圈表面的微裂纹中由低应力区向高应力区扩散,即向裂纹尖端扩散,导致氢脆现象发生,当裂纹的长度达到某一临界值时,材料会发生机械失稳脆性断裂,形成磨屑剥离,发生剥层磨损。

由以上分析认为,经过淬火处理的轴承套圈硬度高但塑性和韧性较差,在冲击滑动摩擦作用下淬硬材料表面产生微裂纹,而高温使润滑油的腐蚀作用增强以及变质析出氢,导致氢致磨损,表面微裂纹会快速扩展并剥落,导致严重磨损;而由于经过调质处理的保持架塑性和韧性都比较好,吸收和减缓冲击能量的作用较强,抵抗裂纹扩展的能力较好,因而磨损较轻。此外保持架和套圈材料都是钢,其摩擦配合性能差,摩擦系数

大,客观上加速了这一磨损过程。

### 3 结 语

经过总结几种反常磨损失效的情况,以及对涡喷发动机主轴轴承磨损深入分析研究得出:反常磨损的发生是高频冲击、高速滑动磨损,以及高温下润滑油对摩擦副的化学作用等多种因素的耦合作用,同时还由于摩擦副材料的硬度、韧性以及内部组织的不同,导致硬度高但韧性差的材料磨损严重。今后,必须在研究过程中充分考虑各种作用的影响,以及苛刻工况等因素对材料磨损的耦合作用,需要进行模拟实际工况的实验研究,实现反常磨损的复现,观察磨损表面形貌及成分,深入细致地研究磨损机理,并进行实验验证,为防止反常磨损的发生提供理论依据。

#### 参考文献:

- [1] 王黎钦,李秀娟,古乐,等. 弹用混合式陶瓷轴承的开发研究[J]. 推进技术, 2001, 22(6): 522-525.
- [2] RYAN R, GROSS L A. Developmental problems and their solution for the Space Shuttle main engine alternate liquid oxygen high pressure turbopump: Anomaly or failure investigation the key[R]. [s. l.]: NASA, 1995.
- [3] BOSSON R, SABIN P, TURIN G. Improvement of the hydrogen turbopump for the VULCAIN 2 engine[A]. AIAA, 35th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit[C]. [s. l.]: [s. n.], 1999: 20-24.
- [4] 刘海春,张嗣伟. 几种橡胶磨损 45# 钢的影响因素分析[J]. 摩擦学学报, 1997, 17(4): 321-326.
- [5] 王黎钦,李秀娟,古乐,等. 涡喷发动机高温高速轴承失效机理及改进措施[J]. 机械科学与技术, 2002, 21(6): 963-965.
- [6] 周延泽. 高速角接触球轴承保持架振动与强度研究[D]. 北京:北京航空航天大学, 2000.
- [7] 杨业元,方鸿生,郑燕康. 冲击磨损失效行为的研究[J]. 矿山机械, 1995, (7): 25-28.
- [8] 杨书申,彭竹琴. T10 钢脉动冲击磨损规律的试验研究[J]. 郑州纺织工学院学报, 2001, 12(4): 51-54.
- [9] OOTANI T, YAHATA N, FUJIKI A, et al. Impact wear characteristics of engine valve and valve seat insert materials at high temperature: Impact wear tests of martensitic heat-resistant steel SUH3 against Fe-base sintered alloy using plane specimens[J]. JSME International Journal, 1996, 39: 115-122.
- [10] IMRAN T, JACOBSON B, SHARIFF A. Quantifying diffused hydrogen in AISI-52100 bearing steel and in silver steel under tribo-mechanical action: Pure rotating bending, sliding-rotating bending, rolling-rotating bending and uniaxial tensile loading[J]. Wear, 2006, 261: 86-95.
- [11] 张天成,姜晓霞,李诗卓. Ti6Al4V 合金氢致脆性磨损机制[J]. 腐蚀科学与防护技术, 1999, 11(3): 142-146.

(上接第 307 页)

两种算法的缺点,提出一种改进的流媒体拥塞控制算法,采用对下一时刻丢包率的预测来调整参数和平稳增长因子对算法进行改进,仿真实验表明,降低了实时流媒体的接收端的延迟和抖动,进一步提高了实时流媒体的 QoS。

#### 参考文献:

- [1] 章程,李建华. 实时视频传输的反馈拥塞控制策略[J]. 计算机工程, 2002, 28(2): 56-58.
- [2] 陈志军,封筠,王满顺,等. 流媒体技术及应用[J]. 河北工业科技, 2003, 20(4): 48-51.
- [3] 杨传栋,余镇危,王行刚,等. 端到端的流媒体传输控制技术综述[J]. 计算机工程与应用, 2005, (8): 26-30.
- [4] YANG R, MIN S K, LAM S S. Transient behaviors of TCP-friendly congestion control protocols[J]. Computer Networks, 2003, 41(2): 193-210.
- [5] MARAKBY R, HUTCHISON D. Towards managed real time communications in the internet environment[EB/OL]. <http://www.2.scut.edu.cn/IEECCS>. 1997.
- [6] SEHULZFINNE H, CASNER S. RTP-transport protocol for real time applications[EB/OL]. <http://www.ietf.org/html.charters/wg-dir.html>. 1996.
- [7] 唐成. 基于 RTP 的 MPEG-4 视频传输研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2004.