

滚动轴承失效

失效识别和轴承检测

滚动轴承失效

失效识别和轴承检测

出版号: WL 82 102/2 CN-CN

2001年版

前言

滚动轴承是一种应用广泛的机械零件。即使在非常恶劣的工况下，它们仍然具有高的可靠性而且很少出现早期失效。

滚动轴承失效首先主要表现为轴承的不正常运转状况。通过检测发现，轴承的失效现象具有广泛性和多样性。单独分析轴承本身通常不足以查明轴承失效的真正原因，还要检查相邻结构、润滑、密封、运转工况和周边环境。一套有效的检测程序有助于判定失效原因。

这本手册基本上是一本工作指南。它包括了轴承的典型的失效形式，以及失效的原因和补救措施。除了有失效模式实例外，也描述了在早期阶段发现轴承失效的可能性。

在常规性的预防性维护保养中，没有失效的轴承也要检测。因此，这本手册包含了常见的轴承运行特性方面的例子。

封面：看上去像是一张俯瞰的沙丘照片，实际上是推力圆柱滚子轴承的波纹状的表面磨损形貌。从波峰到波谷的高度小于1微米。在低速时，滑动接触区发生混合摩擦。由粘着磨损导致的波纹。

	页		页
1	非正常的运转意味着失效	4	
1.1	主观识别失效	4	
1.2	用技术设备进行轴承监测	4	
1.2.1	大面积扩散的损坏	4	
1.2.2	局部损坏	6	
1.3	轴承紧急更换 - 剩余寿命	7	
2	保存好失效的轴承	9	
2.1	查明工况数据	9	
2.2	润滑剂取样及检查	9	
2.3	检查轴承环境	10	
2.4	评估安装状态下的轴承	10	
2.5	拆卸损坏的轴承	10	
2.6	配合面检查	10	
2.7	评估整套轴承	10	
2.8	失效轴承返回FAG及评估单个零件	10	
3	对拆下的轴承评估运转特性和损坏情况	11	
3.1	采取的措施	14	
3.1.1	给拆分的零件做标记	14	
3.1.2	成品轴承测试	14	
3.1.3	轴承拆套	14	
3.1.4	评估轴承零件	14	
3.2	配合面状况	15	
3.2.1	微动腐蚀	15	
3.2.2	抱轴伤痕或滑动磨损	16	
3.2.3	轴承套圈支撑不均匀	17	
3.2.4	端面擦痕	18	
3.3	滚动接触模式	19	
3.3.1	轨迹的成因和含义	19	
3.3.1.1	正常轨迹	19	
3.3.1.2	异常轨迹	21	
3.3.2	滚道和滚动体表面的凹痕	27	
3.3.2.1	断裂	27	
3.3.2.2	内圈的腐蚀损坏	34	
3.3.2.3	假性布氏压痕	36	
3.3.2.4	滚动体表面的凹痕	37	
3.3.2.5	由于过电流造成的凹坑和凹槽	38	
3.3.2.6	滚动体边缘运行	39	
3.3.3	套圈断裂	40	
3.3.3.1	由于滚道疲劳引起的断裂	40	
3.3.3.2	轴向原始裂纹和内圈通裂	40	
3.3.3.3	外圈周向断裂	41	
3.3.4	接触表面上的深度擦伤和拖痕	42	
3.3.4.1	润滑不良造成的磨损	42	
3.3.4.2	滚动体外径上的擦伤	44	
3.3.4.3	打滑痕迹	45	
3.3.4.4	划痕	46	
3.3.5	过热造成的损坏	47	
3.4	挡边接触的评估	48	
3.4.1	滚子轴承的挡边和滚子端面损坏	48	
3.4.1.1	由外界颗粒造成的擦伤	48	
3.4.1.2	挡边接触处的粘着	49	
3.4.1.3	挡边接触区的磨损	50	
3.4.1.4	挡边断裂	51	
3.4.2	保持架引导表面的磨损	52	
3.4.3	密封接触区的损坏	53	
3.4.3.1	密封接触区的磨损痕迹	53	
3.4.3.2	密封接触区的变色	53	
3.5	保持架损坏	54	
3.5.1	贫油和污染造成的磨损	54	
3.5.2	速度过高造成的磨损	54	
3.5.3	滚子偏斜造成的磨损	55	
3.5.4	倾斜引起的球轴承保持架磨损	55	
3.5.5	保持架连接部位断裂	56	
3.5.6	保持架断裂	56	
3.5.7	不正确安装造成的损坏	57	
3.6	密封损坏	58	
3.6.1	密封唇的磨损	58	
3.6.2	不正确安装造成的损坏	59	
4	FAG的其它检测方法	60	
4.1	轴承和轴承零件的几何测量	60	
4.2	润滑剂分析和润滑剂检测	63	
4.3	材料检测	65	
4.4	X射线微观结构分析	66	
4.5	扫描电子显微镜检查	67	
4.6	零件测试	69	
4.7	计算载荷状况	71	

非正常的运转意味着失效

主观识别破坏 · 用技术设备监测轴承

1 非正常的运转意味着失效

轴承的破坏通常首先表现为运转状况的逐渐恶化。由于轴承本身失效而导致的立即停机很少见，比如由于安装错误或者缺少润滑。根据运转状况，轴承从开始损坏到真正失效可能要几分钟，某些场合下可能会几个月。选择轴承监测类型时，要以轴承的应用场合和轴承在设备上运转时的失效率为基础。

1.1 主观识别失效

在大多数的轴承应用中，操作人员若发现轴承系统运转不平稳或有异音，就可以判断轴承已损伤，见表1。

1.2 用技术设备进行轴承监测

当轴承失效会有危险事件发生或是导致长期停机时，需要对轴承的运转情况有精确而长期的监测。以发动机的涡轮和造纸机为例。为了使监控可靠，必须基于预期的失效类型来选择。

1.2.1 大面积扩散的损坏

充足而清洁的润滑剂是无忧运行的主要前提。可以通过以下方法检测不良的变化：

- 监测润滑剂供给
 - 观油窗
 - 测量油压
 - 测量油流量
- 检测润滑剂里的磨粒
 - 定期取样，用电磁探头在实验室进行光谱分析
 - 连续取样
电磁信号发送器通过粒子计数器持续地在线检测流过的颗粒数量
- 测量温度
 - 一般用热电偶

1：由操作人员发现的失效

现象	失效原因	例如
运转不平稳	套圈或滚动体的损坏	机动车辆 车轮幅度加剧 倾斜游隙增加 导向系统的振动
	污染	风机： 不断增强的 振动
	轴承游隙过大	锯： 连杆处冲击和振动较多
工作精度降低	由于污染或润滑不足造成的磨损	车床： 工件的振纹进一步发展
	套圈或滚动体的破坏	磨床： 波纹状的磨削表面
	游隙或预载改变	冷轧： 冷轧材料的周期性表面缺陷，如拉伸变形、偏析流线等。
不寻常的运行噪音： 马嘶声或振鸣声 隆隆声或不规则的噪音	不充足的工作游隙	电机 齿轮 (因为总是被齿轮的噪音淹没，所以轴承的噪音很难识别)
	运行噪音逐渐变化	由于温升造成的工作游隙变化 破坏的运行表面（例如由于污染或疲劳）

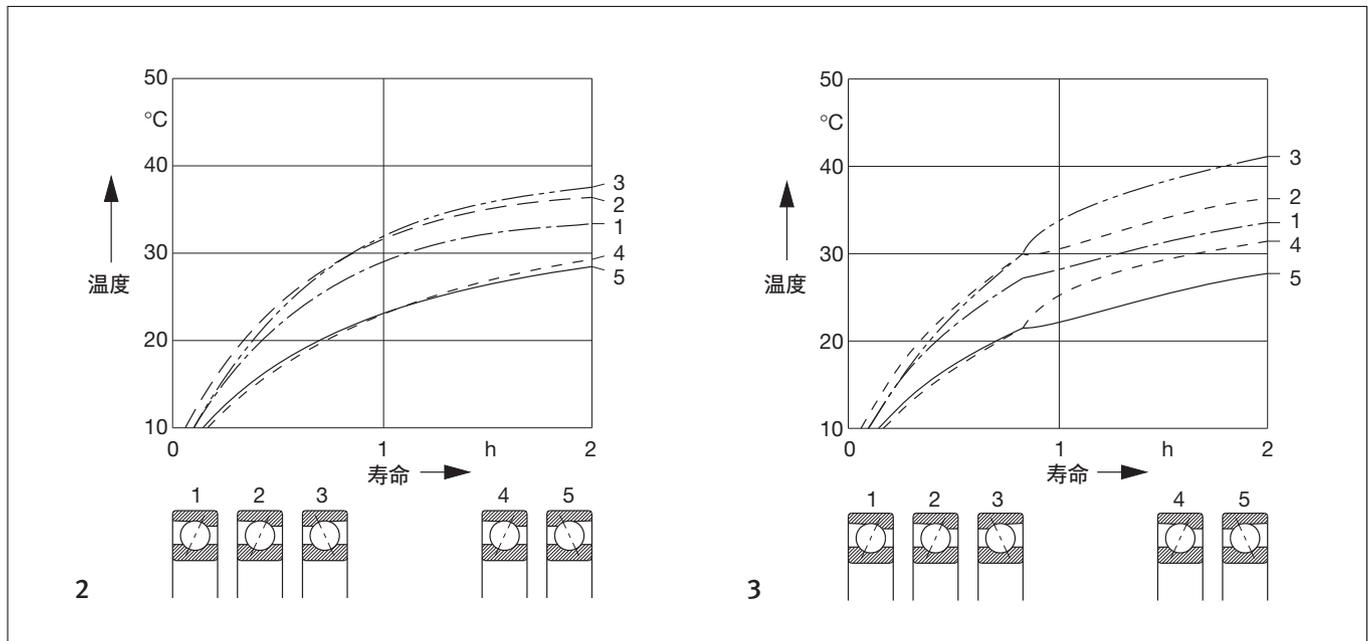
非正常的运转意味着失效

用技术设备进行轴承监测

2：机床主轴轴承的温度变化。

试验条件： $n \cdot d_m = 750\,000 \text{ min}^{-1} \cdot \text{mm}$ 。

3：受干扰的浮动轴承的温度变化。试验条件： $n \cdot d_m = 750\,000 \text{ min}^{-1} \cdot \text{mm}$ 。



通过测量温度可以可靠而且相对简单地检测出由于润滑不足造成的轴承失效。

常规温度特性：

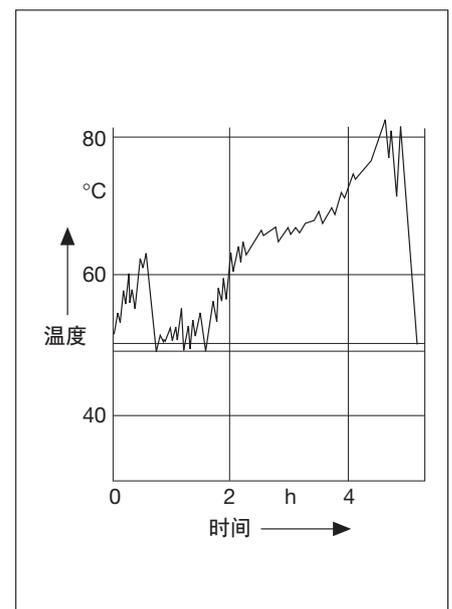
- 在平稳运转时能达到一个稳定的温度，见图2。

非正常的特性：

- 温度的突然升高可能是由于缺少润滑或者是轴承的径向或轴向过预载造成，见图3。
- 温度变化不平稳而且温度有持续上升趋势通常是由于润滑状况的恶化，比如已达到润滑脂使用寿命，见图4。

然而，用测量温度的方法来判断该处的初期损坏是不合适的，例如疲劳。

4：当润滑脂失效后，温度变化与时间的关系。试验条件： $n \cdot d_m = 200\,000 \text{ min}^{-1} \cdot \text{mm}$ 。



非正常的运转意味着失效

用技术设备进行轴承监测

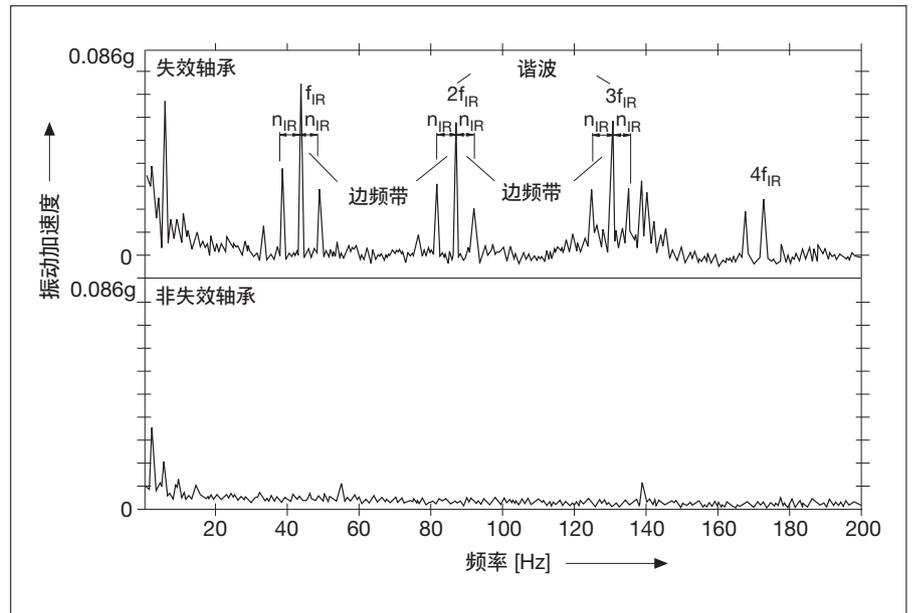
1.2.2 局部损坏

轴承的局部损坏比如由滚动体引起的凹痕、静态腐蚀或断裂，都能够通过振动测量及时发现这些问题。通过路径、速度和加速度传感器记录循环运动下的凹坑引起的振动波。根据运转状况和期望的可信度，这些信号可以不同的方式做进一步处理。最常见的是：

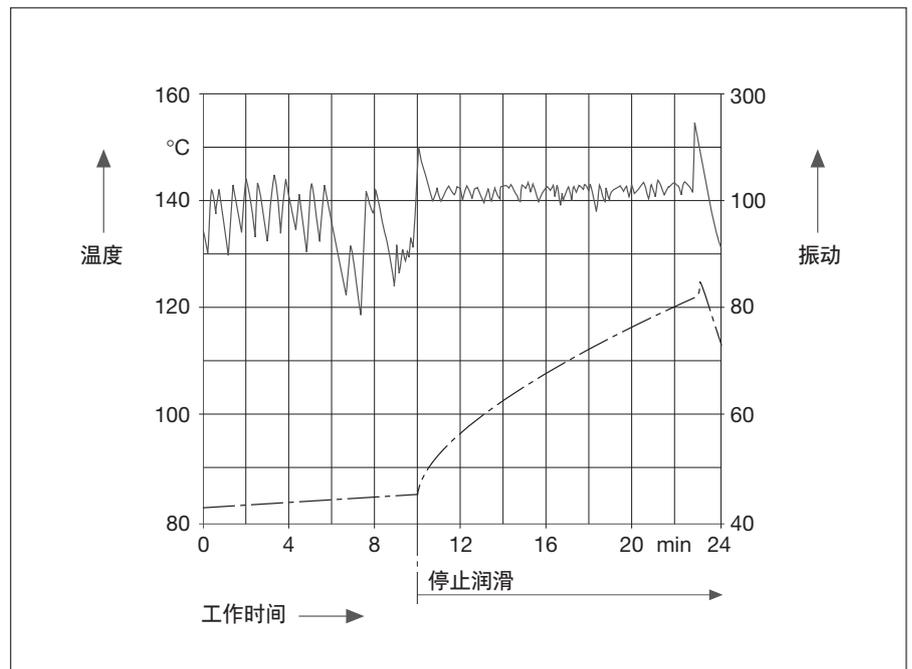
- 测量有效值
- 测量振动值
- 通过包络检波进行信号分析

经验表明后者的可靠性和适用性更强。用一种特殊的信号处理方式，甚至可以找到损坏的轴承部件，见图5和6。更多信息请参考我们的TI No. WL 80-63《用FAG轴承分析仪诊断滚动轴承》。

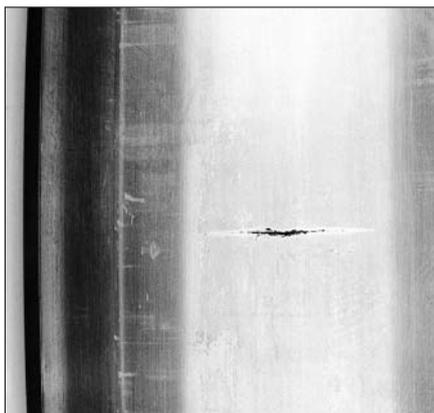
5：在0到200 Hz间的包络信号频谱，下面：完好的轴承；上面：损坏的轴承
 n_{IR} 内圈转速 [min^{-1}]
 f_{IR} 内圈信号频率 (循环频率) [Hz]



7：温度变化和振动值与润滑停止时间的关系。主轴轴承 B7216E.TPA; P/C = 0.1; $n = 9000 \text{ min}^{-1}$; 润滑油ISO VG100。



6：通过包络检测法发现造纸机上的调心滚子轴承内圈损坏。



非正常的运转意味着失效

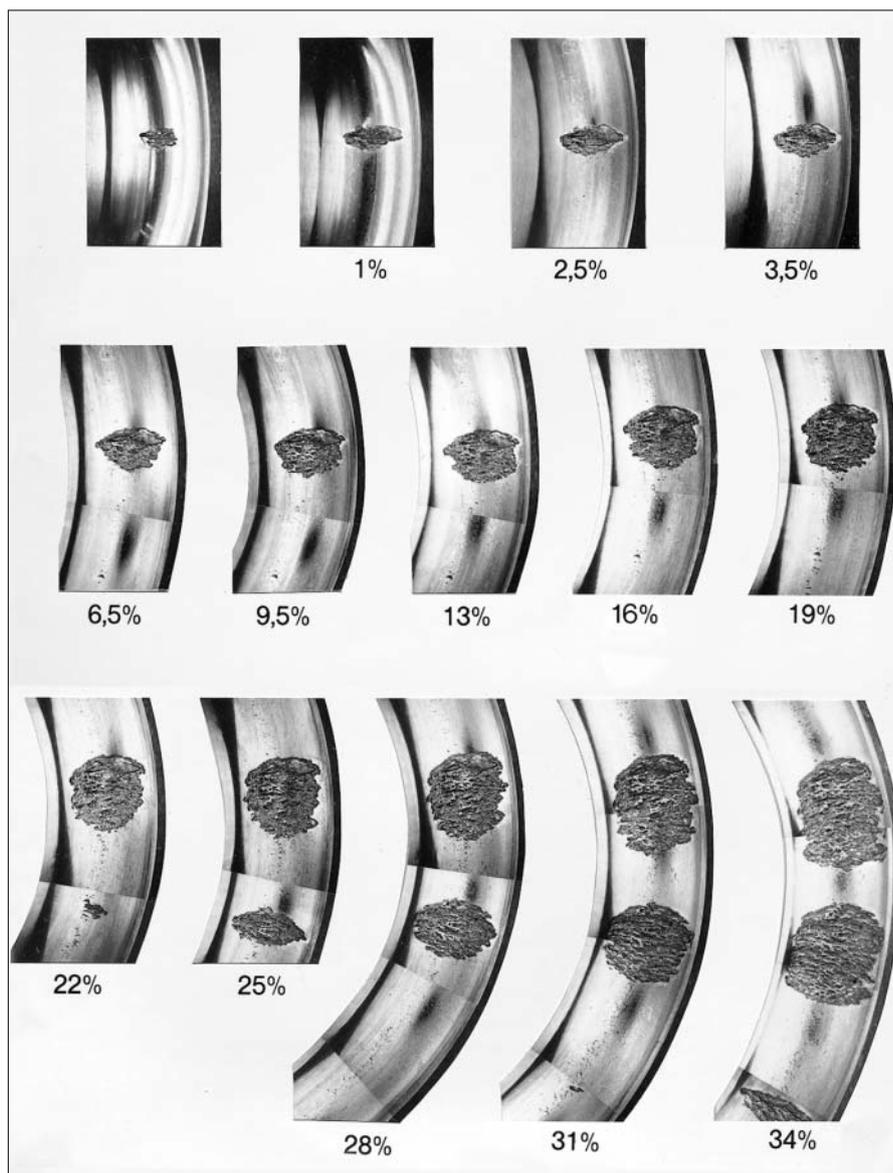
用技术设备监测轴承·紧急更换轴承

振动检测程序非常适用于监测轴承的疲劳损坏。对点接触的轴承（球轴承）是最简单的；对于滚子轴承，可以用像包络圆检测这样复杂的评估程序可靠地找到受损处。然而这种监测方法不太适合观察润滑状况。如上述，润滑供应方面的问题可以通过温度检测来发现。图7很好地显示了这一点。振动值远没有温度传感器那样灵敏。因此如果条件允许，用温度测量和振动测量来互相补充是最理想的。

在许多情况下，尽管轴承已出现损坏，但是机床仍然可以在无生产质量问题下继续运转。它能使用多久与轴承载荷、速度、润滑和润滑剂的

清洁度有关。对球轴承进行了大量的在各种载荷下的破坏扩展试验。

8：角接触球轴承内圈滚道疲劳破坏的发展。
从失效出现开始，检查的时间周期以名义寿命 L_{10} 的百分比给出。



1.3 轴承紧急更换 - 剩余寿命

一旦检测出轴承损坏，随之而来的问题就是考虑是否马上更换轴承或是可以继续使用直到机器的下个预定停机时间。在做出决定前有几个轴承条件必须考虑。比如轴承损坏可能导致机床的工作精度降低，那么轴承更换的紧急性首要考虑无质量缺陷的零件还能继续生产多久。当然，由于供油系统的中断使得轴承在高速下因过热而突然抱死就必须马上更换轴承。

非正常的运转意味着失效

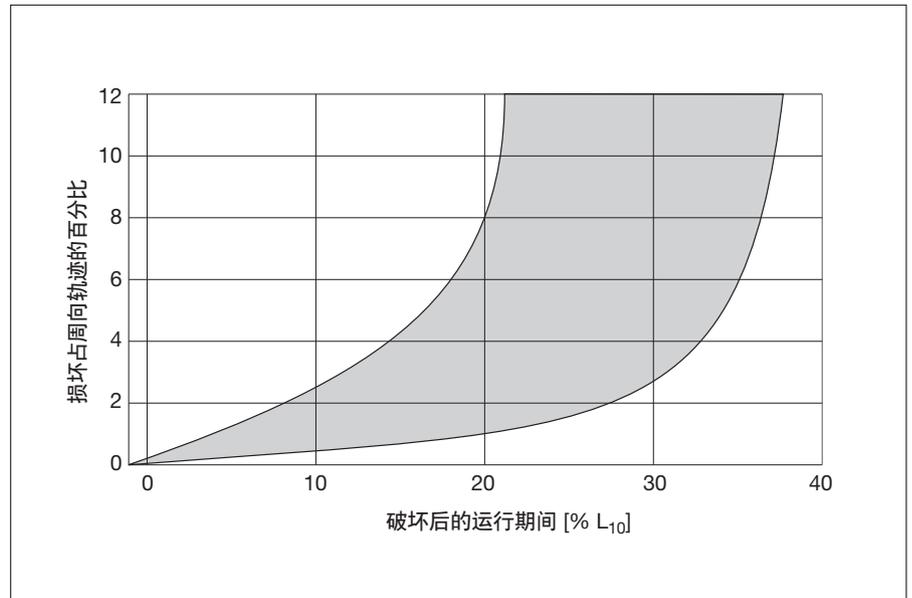
紧急更换轴承

主要的结果如下：

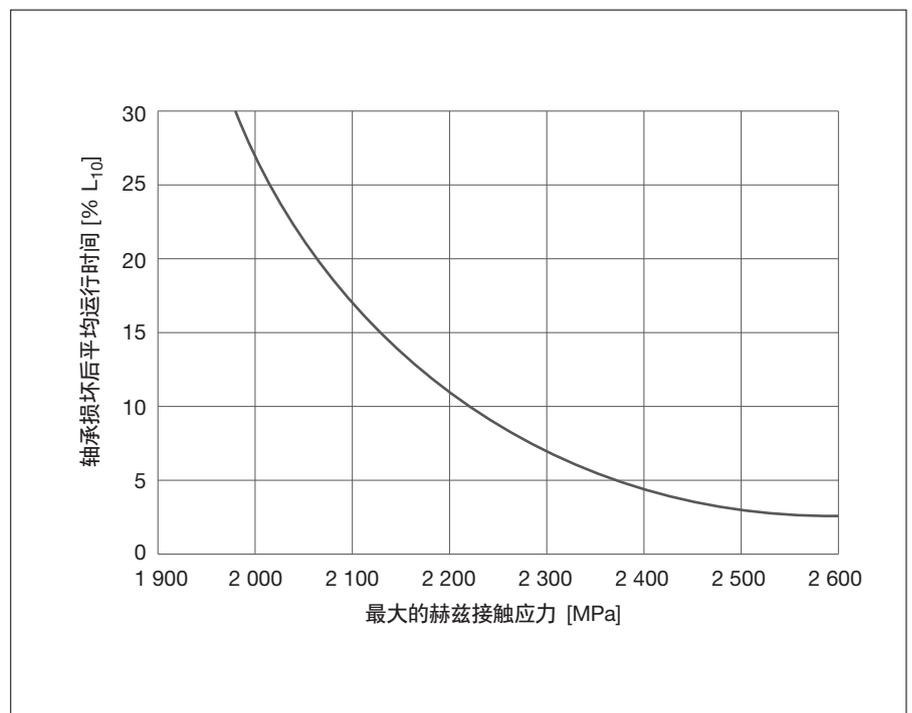
- 在中等载荷下疲劳扩展很慢，因此一般情况下不需要在下一次预计停机时间前更换轴承。
- 随着载荷的增加，疲劳发展很快。
- 疲劳处开始扩展很慢，但随着疲劳面积的增大，疲劳加速。

图8（第7页）、图9和图10显示了这些发现。

9：破坏（当大约0.1%的周向轨迹剥落时）发生后，破坏区域大小与运转时间的关系



10：直到周向轨迹有1/10损坏时，角接触球轴承发生疲劳破坏后的平均剩余运转时间基于应力状况的关系。在第一个疲劳破坏迹象前的运转状况：弹性流体动压润滑最清洁的状况。



2 保存好失效的轴承

由于要查明轴承破坏的原因和避免将来的失效，轴承应从设备中取出。为取得最可靠的结果，保存和检测轴承时可以采取以下流程。通过这种方式，当检查从设备预防性维护保养中拆下的轴承时，要考虑以下几点。
建议的检测顺序：

- 检查工况数据，评估从轴承监测设备中得到的记录和图表
- 提取润滑剂试样
- 检查轴承环境以取得外界的影响和其它破坏因素
- 评估安装状态下的轴承
- 标记安装位置
- 拆卸轴承
- 给轴承和部件做标记
- 检查轴承的配合面
- 评估整套轴承
- 检查单个轴承零件或送至FAG

如果选择的流程不合适，那么寻找轴承失效原因所需要的重要数据可能会永远丢失。当保护失效轴承的方法不当时，也会掩盖失效模式或者至少会使轴承真正的失效原因难以被发现。

2.1 查明工况数据

当滚动轴承失效时不仅要检查轴承本身，而且使用环境和应用工况也要事先检查（如果可能的话要查看装配图）。

- 应用背景：
设备、轴承位置、实际工作寿命、有多少类似的设备及这些设备里有多少轴承失效
- 轴承结构：
定位轴承，浮动轴承
浮动轴承布置
可调整轴承（弹性预载、刚性预载；带隔环、通过安装垫片）
- 速度：
恒定的，变化的（内圈和外圈）
加速，减速或滞后

- 载荷：
轴/径向、联合载荷、倾覆力矩
恒定的，变化的（混合的）
振荡（加速，振幅）
离心力
点载荷，圆周载荷（哪个套圈转动？）
- 配合件：
轴配合面，轴承座配合面（配合情况）
紧固件（比如：锁紧螺母类型，弹性螺栓等）
- 环境状况：
外界高温，低温
特殊介质（比如：氧气，真空，辐射）
静态振动
灰尘，污物，潮气
腐蚀性介质
电场或磁场
- 润滑：
润滑剂，润滑剂量
润滑剂供给
再润滑周期
最后一次再润滑的日期/最后一次换油日期
- 密封
接触式，非接触式
- 损坏轴承的背景：
第一次安装或更换轴承
轴承位置的改变
到目前为止的失效频率
计算的 L_{10} 寿命
一般可达到的寿命
到目前为止，运转期间的特性
其它机器部件的维修（结构测量，焊接）
由于其它机器零件（比如密封损坏，润滑油泄漏）导致的设备故障
- 设备或轴承的运输距离和运输方式
包装
- 如果有轴承监测设备的话，来自于轴承监测设备的监控记录和图表

2.2 润滑剂取样及检查

润滑剂可以揭示滚动轴承的各种失效原因。但必须有合适的检测样品（对不带密封的轴承），请参考DIN 51750、ASTM标准D270-65和4057-81。

- 脂润滑：
 - 记录轴承环境里的润滑脂分布状态和颜色
 - 从轴承内部和轴承周围的不同位置抽取样品并作相应标识
- 油润滑：
 - 从靠近轴承的油路里或是从供油器的中部抽取油样
 - 在设备运转时或设备刚停后抽取油样，以获得杂质的典型分布
 - 不要从底部或刚过滤后的润滑油里抽取油样（颗粒浓度不正确）
 - 除了润滑油样品外，过滤器中的残余物也要保存下来做检测（表明了失效前的状况）
- 总则
 - 轴承多久被再润滑或是润滑油多久被更换？最近一次是什么时候进行的？
 - 检查润滑油或润滑脂是否有任何从轴承或其它部件上脱落的成份
 - 使用干净的容器盛装样品。它们应该由合适的材料制成（比如玻璃）
 - 容器中应留有足够的空间以便在实验中搅拌润滑油样品
 - 样品可以在客户的实验室、外部润滑剂实验室或在FAG公司进行分析。应该关注的方面有污染程度和污染物类型（砂砾、铁屑、软颗粒、水、冷却液）以及对润滑剂本身的分析（比如：老化、稳定性、颜色、焦化、添加剂比例）。如果可能，新鲜润滑脂或润滑油的样品也一并提交检测（当润滑剂和热效应未知时）

保存好失效的轴承

2.3 检查轴承环境

- 周边是否有擦伤轴承零件的某些部件？
- 轴承邻近的部件是否受到了损坏（是事后还是事前破坏）？
- 密封内外的清洁度（在轴承的空间内是否有杂质？）
- 轴承紧固件是否松动（轴承是否在力的作用下变形？螺栓松动？）

2.4 评估安装状态下的轴承

- 是否有断裂或碎裂的区域？
- 密封是否被破坏？特别是否有变形或硬化？
- 看到轴承是否变形？
- 能否检测到外界物质的擦伤？
- 在安装状态下，轴承能否正常运转？（根据配合效果）

2.5 拆卸损坏的轴承

当拆卸损坏的轴承时，须注意不要破坏失效模式。如果做不到这一点，则需把拆卸而导致的轴承损坏做标记并记录下来。如果可能，要遵守以下流程：

- 不要通过滚动体传递拆卸力
- 大的拆卸力可能表明浮动轴承的功能受到了破坏
- 不要打开带密封的轴承
- 加热温度不要过高以免破坏对温度敏感的部件（润滑剂，密封，保持架）
- 给轴承做标记（安装位置，安装方向）

2.6 配合面检查

- 轴和轴承座尺寸（配合过紧，配合太松）
- 配合面的形位公差（椭圆度）
- 配合面的粗糙度（过多的材料缺失）
- 微动腐蚀（腐蚀程度表明支撑不均匀的程度，载荷方向）

2.7 评估整套轴承

需评估的轴承在提交时应是未清洗过的，也就是仍带有润滑剂。

要检查下面几点：

- 总体状况（轴承的清洁度和配合面状况，例如：安装痕迹、微动腐蚀、套圈断裂、尺寸精度、擦痕、变色）
- 密封圈和防尘盖状况。拍照或描述任何润滑脂泄漏的位置和程度。
- 保持架状况
- 手动转动测试（表明污染、损坏或预载）
- 测量轴承游隙（套圈在径向和轴向移动），保证轴承均匀受载和转动！

2.8 失效轴承返回FAG及评估单个零件

失效原因基本上能经常被客户自己或是FAG现场服务工程师发现。是否需要进一步的特殊检测与每个不同的失效特性有关。下面详细描述了检测每个轴承部件的流程。如果很明显将要在FAG测试，那么发运的轴承要做如下准备：

- 既不要拆套轴承也不要清洗轴承。决不要用冷清洁剂或汽油清洗（否则润滑剂中的线索会消失，且有腐蚀性）。
- 避免拆卸后的污染。如果可能的话用干净的金属箔对轴承单独包装，因为纸和布会把润滑脂中的油吸取掉。
- 要用足够强和厚的包装避免运输途中的破坏。

3 对拆下的轴承评估运转特性和损坏情况

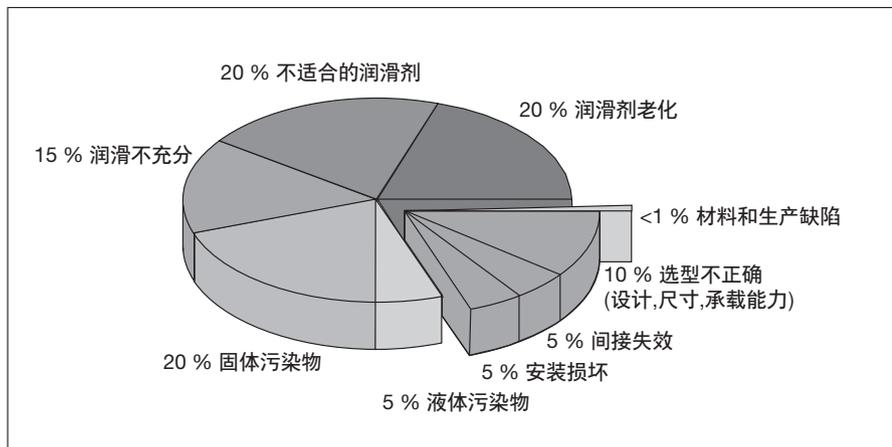
轴承失效不仅能揭示单个滚动轴承的失效，而且也能表明轴承布置是否合理。应该记住：问题轴承拆卸的越早，轴承失效原因就能被发现的越早。

保证轴承配置平稳运行的先决条件是：运行、环境条件和配置中的所有部件（轴承，配合件，润滑剂，密封）正确的配置。轴承失效原因并不总单独存在于轴承本身。由于轴承材料和生产失误造成的轴承失效非常少。在通过检测每个轴承部件来检测轴承失效原因前，应根据第2章节的方法来研究可能的失效原

因。轴承的运行状况或外部特征经常能提供轴承失效的线索。图12的表格表明了滚动轴承主要的失效特征及引起失效的典型原因。

这个总结不能包括所有的失效但是提供了一个粗略的大纲。要提醒大家的是些失效模式只在或几乎是只在某些类型的轴承中发现或是在一些特殊的应用工况下发现。在许多情况下，一个轴承会同时表现出几个失效特性。因此确定失效的初始原因经常很困难，要系统的假设各种失效原因。对这种案例推荐使用以下系统流程。

11：滚动轴承的失效原因（来源：antriebstechnik 18 (1979) No. 3, 71-74）。只有大约0.35%的滚动轴承没有达到预期的寿命。



对拆下的轴承评估运转特性和损坏情况

12：滚动轴承失效现象和原因

现象	轴承损坏区域					滚动轴承失效的典型原因					
	配合面	滚动接触区域	挡边和滚子端面	保持架	密封	安装					
						不正确的安装过程或工具	灰尘	配合太紧, 预载太大	配合太松, 预载太小	套圈支撑不足	不对中或轴挠曲
a) 非正常运转特征											
运转不平稳						■	■		■		
不正常噪音						■	■	■	■	■	■
不正常的温度特性								■			■
b) 拆下轴承的零件表面											
1 外界微粒凹痕		■					■				
2 疲劳		■				■	■	■		■	■
3 静止的振动痕迹 (假性布氏压痕)		■									
4 熔化的凹坑和凹槽		■									
5 打滑		■							■		
6 滚动体表面的凹痕, 划痕		■	■			■					
7 擦痕		■	■	■							
8 磨损		■	■	■	■		■				
9 腐蚀		■	■	■	■						
10 过热损坏	■	■	■	■	■			■			
11 断裂	■	■	■	■		■		■		■	
12 微动腐蚀	■								■	■	

现象	滚动轴承失效的典型原因									
	工作应力			环境影响				润滑		
	载荷太大或太小	振动	高速	灰尘, 污物	侵入式介质, 水	过热	电流通过	不适合的润滑剂	润滑剂量不足	润滑剂过量
a) 不正常运转特征										
运转不平稳		■		■	■		■	■		
不正常噪音	■	■		■	■		■	■	■	
干扰的温度特性	■		■			■		■	■	■
b) 拆下轴承的部件表面										
1 外界微粒凹痕				■						
2 疲劳	■			■		■		■	■	
3 静止的振动痕迹 (假性布氏压痕)		■								
4 熔化的凹坑和凹槽							■			
5 打滑	■								■	
6 滚动体表面的凹痕, 划痕	■									
7 擦痕	■		■					■	■	
8 磨损				■				■	■	
9 腐蚀					■			■		
10 过热损坏			■			■		■	■	■
11 断裂										
12 微动腐蚀		■								

对拆下的轴承评估运转特性和损坏情况

采取的措施

3.1 采取的措施

3.1.1 给拆分的零件做标记

- 当同一个轴承配置中有多个相同型号的轴承时，所有的轴承要编号而且要记录它们的位置。
- 配置使用的轴承侧面要做标记包括标记轴承的安装位置。
- 根据外力给套圈的径向安装方向作标记。

3.1.2 成品轴承测试

- 噪音检测
- 检测轴向/径向游隙
- 检测径向/轴向跳动
- 检测摩擦力矩

3.1.3 轴承拆套

- 如果密封轴承有漏脂现象，要确定润滑脂的剂量。
- 小心地从密封轴承中取出防尘盖或密封，尽可能避免变形。
- 评估轴承中的润滑脂分布。
- 润滑脂取样；如果有不规则的润滑模式时要多次取样。
- 如果拆卸是破坏性的，可以破坏不会影响失效原因的部位（比如切掉或车掉圆锥滚子轴承小直径端的挡边）。
- 如果在拆卸过程中不可避免地有破坏，就要做出标记并记录下来。

3.1.4 评估轴承零件

首先要仔细观察主要的运转面和安装面。

推荐用显微镜检查轴承部件，对大部分轴承来说通常是必需的。下面的流程对评估轴承零件来说经常都是适用的：

评估：

- 配合面（轴向配合表面，内圈内孔，外圈外表面）
- 滚道
- 挡边
- 密封配合表面/接触表面
- 滚动体（外表面及滚子的端面）
- 保持架
- 密封

为查明失效原因，有时需要其它检测。这些检测项目包括：润滑剂分析、测量、电子显微镜测试等。在FAG的实验室，相关工作人员都乐意产品的研发提供帮助（参考第4章节）。

经常要做出选择：轴承继续使用还是立即更换？当失效很明显时，毫无疑问地要遵守这些流程。然而这种失效很少。对轴承的评估通常能够反映其使用工况。当检测到异常状况和产生的原因时，通常能够避免进一步破坏。

下面的章节包括现象的描述、起因以及可以采取的适当的、预防性的措施。

3.2 配合面状况

配合面的状况可以反映轴承套圈在轴和轴承座里的支撑情况，我们由此可以得出很多推断。套圈相对配合面的转动会引起异响。它们也能导致微动腐蚀和磨损，从而进一步使润滑剂受到腐蚀性和研磨性微粒的污染。另外随着套圈的支撑情况进一步恶化，微动腐蚀会使拆卸变得困难。下面给出几个例子。

3.2.1 微动腐蚀

现象：

配合面上有黑褐色的拖痕，偶尔在靠近轴承或在润滑剂里也能发现棕色磨损物质。配合面发生磨损（内孔，外圈外表面），对旋转件（通常是轴）来说有可能疲劳断裂，对静止件（通常是轴承座）可能会破坏浮动轴承的功能，见图13。从这些微动腐蚀情况，通常可以推断出承载区的位置和尺寸及套圈的蠕变情况，见图14。

原因：

- 当相对于作用力配合太松时，配合件间会有微动，不能实现同步转动
- 配合表面的加工质量差
- 轴的挠曲，轴承座的变形
- 承受周向载荷的套圈承担浮动轴承的浮动功能

补救措施：

- 承受点载荷的套圈提供浮动轴承的浮动功能
- 尽可能对轴承配合面使用紧配合
- 提高轴（轴承座）的刚度
- 轴承配合面进行涂层
- 使用具有高温尺寸稳定特性的套圈（防止由于材料组织结构的变化使套圈膨胀从而配合变松）
- 改善配合面的圆度
- 如果需要，检查和改善配合面的表面质量

13：配合太松的圆柱滚子轴承内圈内孔的微动腐蚀



14：静止外圈上的微动腐蚀表明了承载区的范围



对拆下的轴承评估运转特性和损坏情况

配合面状况

3.2.2 抱轴伤痕或滑动磨损

现象：

在配合表面（内圈内孔，外圈外表面）和轴向配合表面上有冷焊，或在表面粗糙度好的光亮区也会出现，见图15，16。

配合表面和端面的磨损会使预载减小或是游隙变大，见图17。

原因：

- 在周向载荷作用下松配合的内圈和轴/外圈和轴承座发生旋转；有静载和不平衡时也会如此
- 套圈轴向支撑不充分
- 浮动轴承浮动不顺畅

补救措施：

- 尽可能对轴承配合面使用紧配合
- 增大轴向接触面积
- 保证轴向支撑
- 保证配合面的干燥
- 改善浮动轴承功能

16：内圈内孔上的擦痕是内圈在轴上蠕动的结果



15：外圈外表面上的擦痕是外圈在轴承座里蠕动的结果



17：在内圈端面的周向划痕和冷焊是内圈在轴上蠕动的结果



对拆下的轴承评估运转特性和损坏情况

配合面状况

3.2.3 轴承套圈支撑不均匀

现象：

配合面痕迹不在预期的承载区内。配合面在某些区域磨损而在其它区域完全未接触，见图18, 19。由于载荷分布不均和套圈的弯曲引起的疲劳破坏和断裂。由于圆锥滚子轴承内圈支撑太少而出现挡边断裂（图20），由于接触面太小而发生塑性变形。

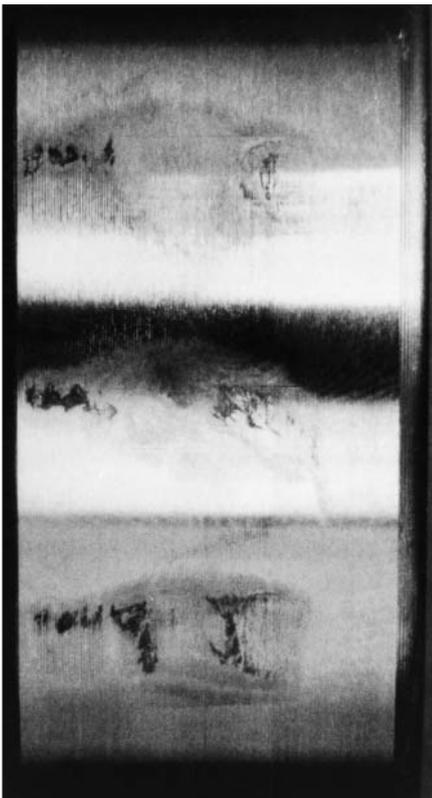
原因：

- 设计不合适
- 机加工精度不够

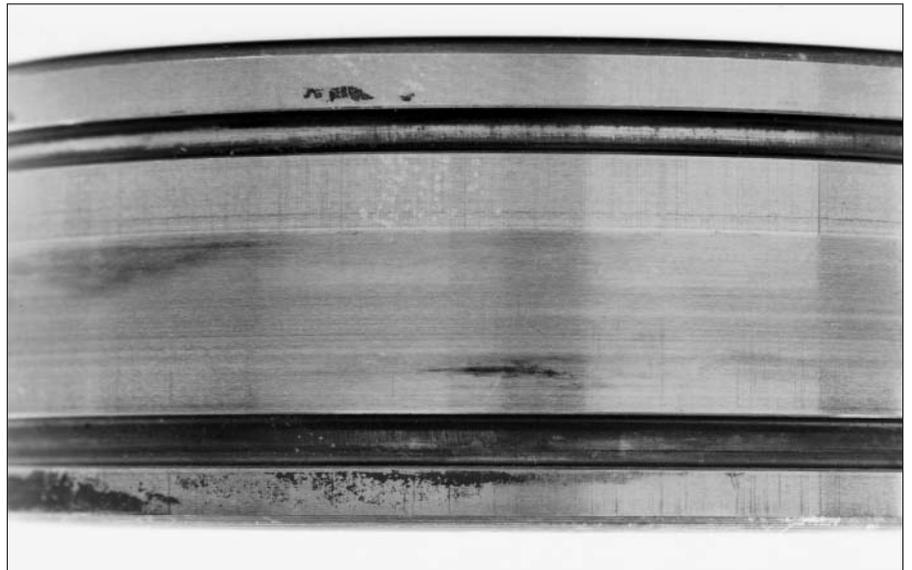
补救措施：

- 更换配合件并保证轴承座的刚度，如有必要使用其它轴承
- 检查配合件

18：外圈外表面的微动腐蚀发生在与轴承座的“刚性点”接触处（比如：加强筋）



19：外圈外径只有一半的宽度被支撑



20：由于端面轴向支撑不足，圆锥滚子轴承内圈挡边断裂



对拆下的轴承评估运转特性和损坏情况

配合面状况

3.2.4 端面擦痕

现象：
周向划痕/轴承套圈端面或密封磨损，见图21，22。

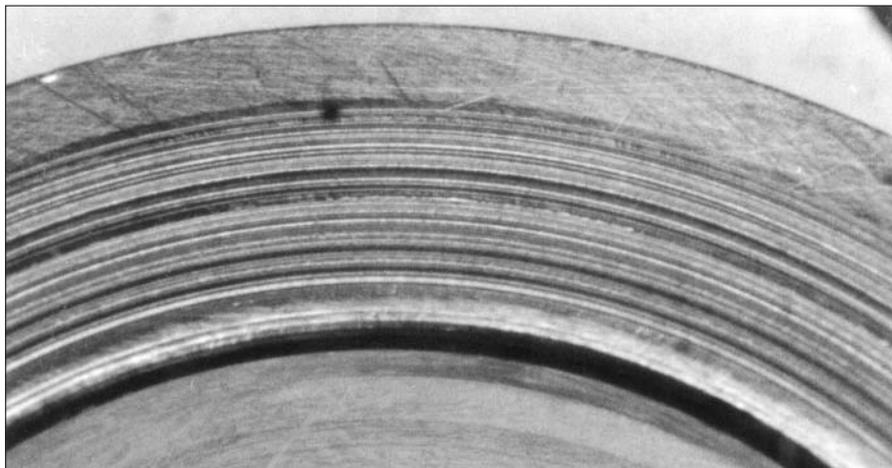
原因：

- 轴承在轴承座或在轴上定位不够
- 在轴承和配合件的配合面之间的窄缝中有大量杂质
- 配合太松
- 轴向游隙太大

补救措施：

- 正确调整配合
- 确保润滑剂的清洁
- 检查轴向游隙，尽可能使其更合适

21：由于配合件的擦伤，圆周有划痕并在端面有冷焊



22：由于端面划痕导致密封破坏



3.3 滚动接触模式

3.3.1 轨迹的成因和含义

不管是否有失效发生，每个工作过的轴承在套圈和滚动体的接触表面都会出现痕迹。这些痕迹是在运转时把加工中产生的表面结构变粗糙或平滑时产生的。由很小的外界微粒循环运转产生的小凹坑也是特征之一。从这些痕迹里可以得出有关润滑质量、润滑剂清洁度和载荷方向及载荷在轴承内分布的结论。

3.3.1.1 正常轨迹

如果润滑油膜能充分将滚动体和滚道隔开，在载荷下旋转的滚动体在滚道上会留下光亮的轨迹。然而，每种形式的轨迹很大程度上与表面的光亮度有关，但是应该能够辨认出几乎所有的机加工痕迹，特别是使用放大镜和显微镜（与滚道边缘的非接触区比较！）。小的外界颗粒造成的个别凹坑是不可避免的。

当润滑相当好时，那些痕迹仅能表明轴承中载荷区的位置，见图23。

当温度在大约80°C以上时，滚道或滚动体通常会变色。它是由钢和润滑剂或钢与润滑剂中的添加剂起化学反应造成的，通常对轴承的运转寿命没有不良影响。相反的是：这些表面特性通常能显示出添加剂的抗磨损性。

通常这些颜色是棕色或蓝色。然而，这些颜色并不能确定导致变色的运转温度。尽管工况很相似，在轴承滚动体上有时会观察到迥异的颜色。

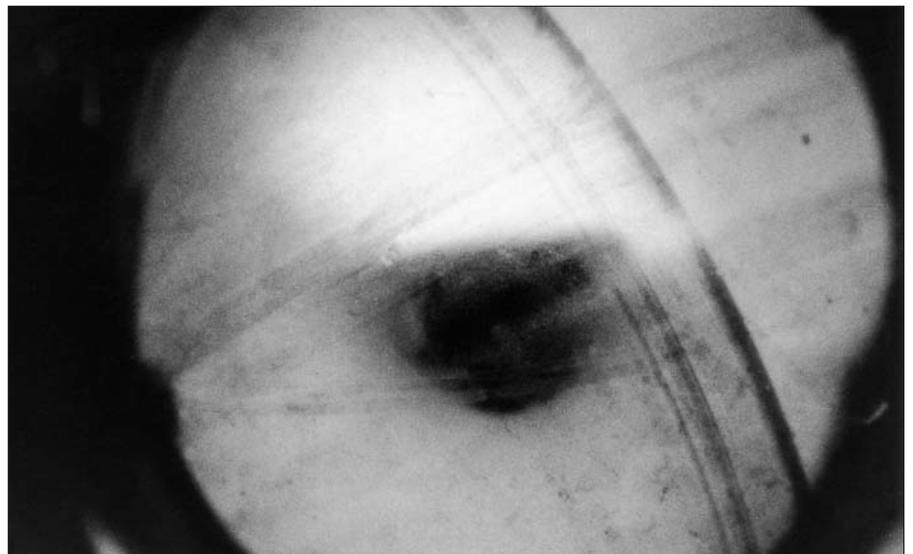
这种润滑油造成的变色决不当与温度过高造成的回火颜色混淆，后者在失效轴承中会发现，但是极少发生，见3.3.5章节。

有时在钢球的赤道区也能发现这种痕迹。当角接触球轴承总是绕相同的旋转轴旋转时，就能发现这样的轨迹。任何这样的痕迹都不能得出明显降低寿命的相关结论，见图24。

23：正常轨迹，表面结构仍然可见，只有外界微粒造成的小凹痕



24：有赤道周向线的钢球

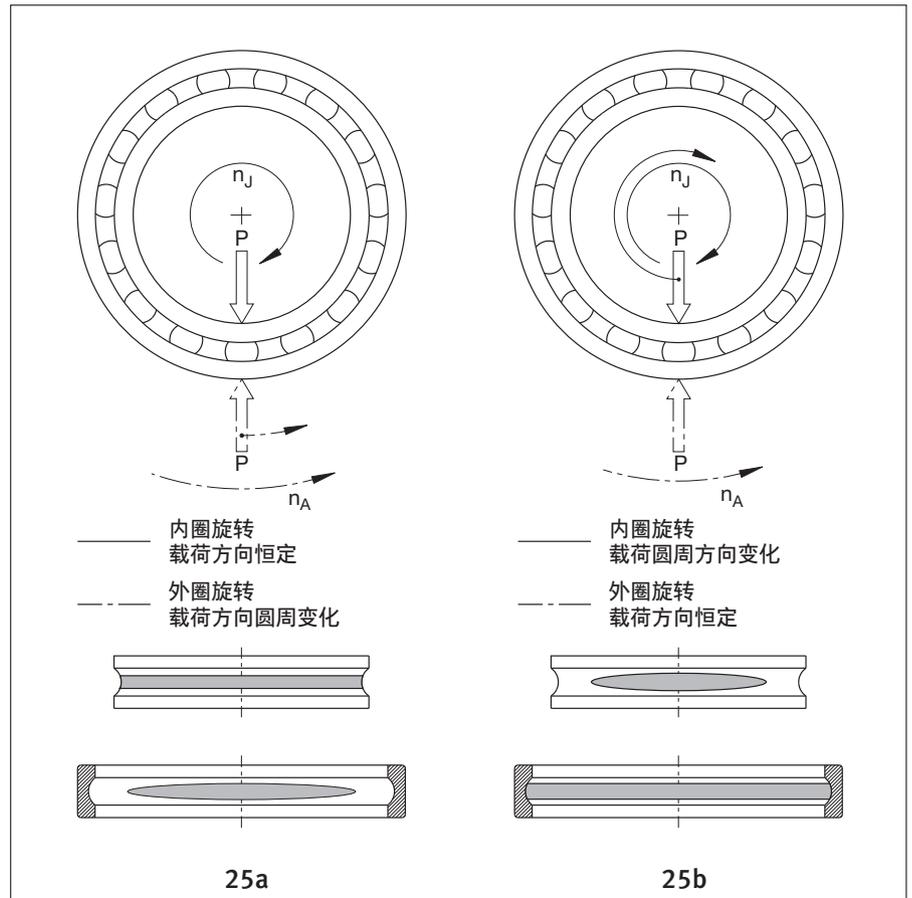


对拆下的轴承评估运转特性和损坏情况

滚动接触模式

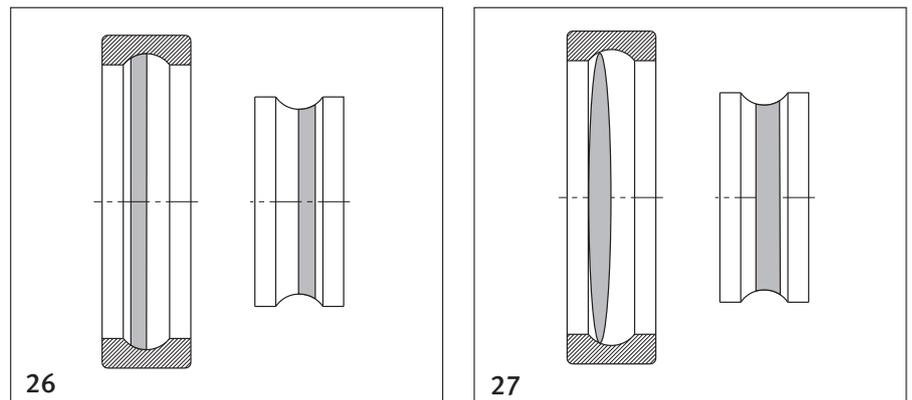
25：向心轴承承受径向载荷，比如深沟球轴承。在点载荷的作用下，在刚度足够的轴承座内，无径向预载时，静止套圈上的轨迹比滚道周向的一半要短。在周向载荷作用下，轨迹在滚道呈圆周方向分布。

- a：外圈点载荷，内圈周向载荷
- b：内圈点载荷，外圈周向载荷



26：向心轴承的轴向载荷，比如深沟球轴承。在内圈和外圈上，轨迹在整个滚道圆周方向的偏心分布。

27：深沟球轴承受轴向和径向联合载荷。在内圈（周向载荷）上，在整个滚道的圆周方向有连续的较宽的轨迹。在外圈（点载荷）上，径向载荷区的轨迹比圆周上其余部分的轨迹要宽。



轨迹形式与外部载荷方向和旋转状态（点载荷或周向载荷，轴向载荷，联合载荷）有关，见图25到27。“理论—实际”的比较能揭示出预期外的载荷状态的重要信息，比如受干扰的浮动轴承功能。在纯径向载荷的作用下，在静止套圈上产生的周向轨迹主要与载荷大小、轴承游隙大小、配合件刚性有关。载荷越大，游隙越小，轴承座刚度越小，承载区的轨迹就越大。

3.3.1.2 异常轨迹

判断轨迹是否正常很大程度上取决于轴承应用。比如，当轴承主要承受径向载荷时有很正常的轨迹，然而当同样的轨迹出现在有轴向预载的轴承工况时是不正常的，它表明了不正确的轴承安装。因此，要了解轴承使用条件以便正确评估轨迹。当然，一些基本的失效现象通常能通过轨迹进行评估。

• 润滑不充分时的轨迹

现象：

可视的轨迹和通过显微镜观察到的表面形貌，可能和润滑质量有关。在中等载荷且没有完全隔开的润滑油膜的状态下，能形成暗色的粗糙的轨迹。

润滑油膜越薄，对表面的影响就越大。对此，可以参考表面没有完全被隔开的例子，见图28。

当接触区的载荷很高时，轨迹是光亮的、压力抛光的，与轨道非承载区形成明显的对比，见图29。

原因：

- 轴承中润滑剂量不足
- 在此工作温度和速度情况下，润滑剂粘度不足（见《FAG滚动轴承》样本，修正的额定寿命计算）

补救措施：

- 改善润滑剂供应
- 使润滑剂的粘度与工况相适应
- 使用含有有效添加剂的润滑剂
- 使用有表面涂层的轴承零件

28：表面磨损的轨迹



29：压力抛光的轨迹



对拆下的轴承评估运转特性和损坏情况

滚动接触模式

• 轴承或润滑剂中有污染时的轨迹

我们必须先区分固体和液体污染物的差别。

固体污染物造成的现象：

外界微粒在滚道上循环运动时会造成凹坑。显微镜观察轨迹时通过凹坑的形式能区分软颗粒、淬硬钢颗粒和硬砂砾颗粒，见图30，31，32。特别大和硬的外界颗粒对轴承寿命有极大的影响。在疲劳失效的描述中能够找到有关这方面更具体的内容，请参阅3.3.2.1章节的“外界颗粒循环运动造成的疲劳”。大量小而硬的外界颗粒能导致接触面变粗糙，如图28，而且加速研磨磨损。

液体污染造成的现象：

水是主要的液体污染物之一。润滑剂中会吸入少量的水。它会降低润滑效果，而且留下如图29所示的痕迹。当轴承中有大量湿气时会有暗淡的痕迹。疲劳破坏的压力抛光轨迹也是由腐蚀或过载造成的，请参阅3.3.2.1章节的“润滑不良造成的疲劳”。

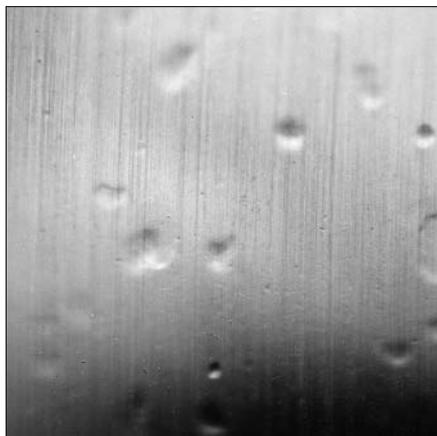
原因：

- 密封不合适
- 安装环境不清洁
- 加工过程中的残留物，比如铸造型砂颗粒
- 温度变化大（冷凝水）
- 润滑油不清洁

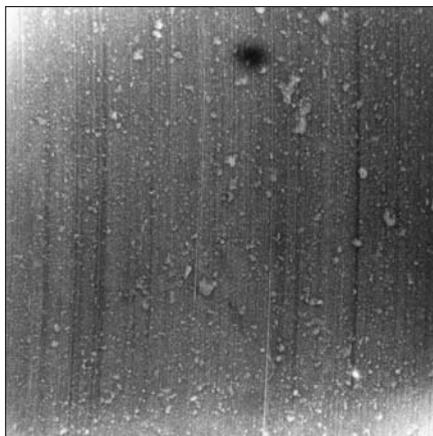
补救措施：

- 改善密封
- 安装环境要清洁，配合件要干净，如有必要涂层
- 工作前(轴承第一次转动前)要清洗整套油路系统

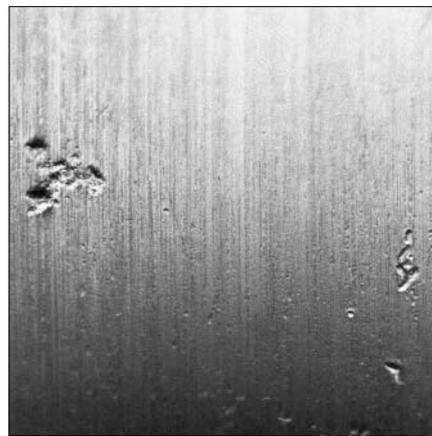
30：软质颗粒所造成的凹坑



31：淬硬钢颗粒所形成的凹坑



32：硬质砂砾所形成的凹坑



• 径向过预载时的轨迹

现象：

图33显示径向过预载时两个套圈上的周向轨迹，在极端状况下可以引起热损坏，见3.3.5章节。

原因：

- 轴/轴承座过盈量太大
- 内外圈的温差太大
- 轴承游隙太小

• 有椭圆变形的轨迹

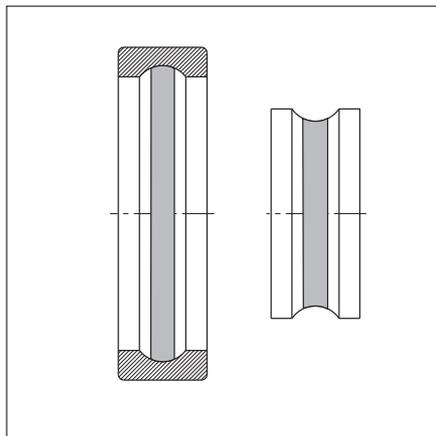
现象：

在静止套圈滚道的圆周上有几个分开的轨迹区域，见图34。

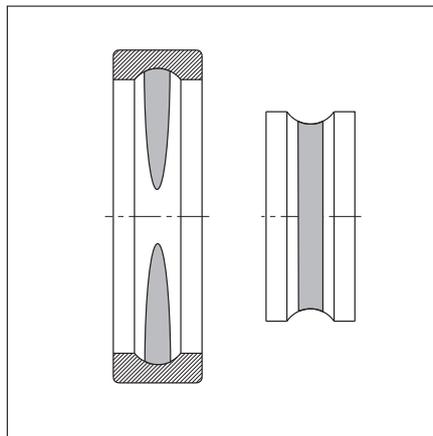
原因：

- 轴承座或轴为椭圆形，比如由于机加工时造成的周向变形或在靠近轴承配合面处攻螺纹孔
- 轴承座在周向有不同的刚度，并且与外圈配合有较大过盈量
- 薄壁轴承垂直存放

33：径向过预载的深沟球轴承。整个圆周方向都有轨迹，甚至承受点载荷的套圈。



34：深沟球轴承的椭圆变形。在椭圆变形的外圈（点载荷）轨道上有两个相对的径向载荷区形成。



对拆下的轴承评估运转特性和损坏情况

滚动接触模式

• 轴向过预载时的轨迹

现象：

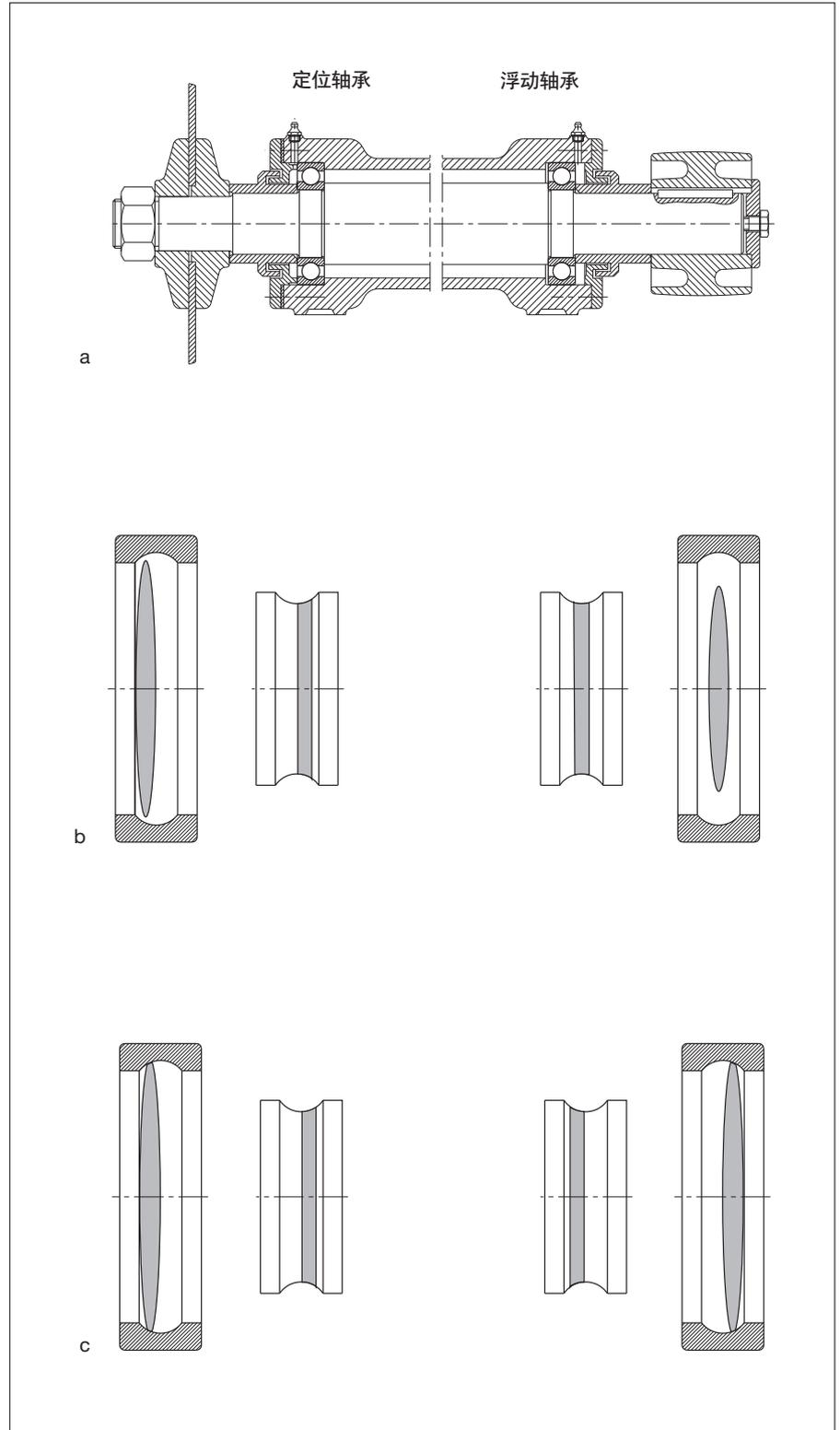
只有固定-浮动轴承配置中的固定端轴承会有这样的轨迹，如图35b所示，这种轨迹是在轴向力作用下产生的（图26）。多数情况下，会发现浮动轴承也存在很小的轴向载荷（最好是没有）。

原因：

- 浮动端轴承的浮动功能受损（错误的配合、径向的热膨胀、倾覆、微动腐蚀）
- 未预料到的大的轴向热膨胀

补救措施：

- 检查配合和配合件的形位公差
- 改变安装和运行状况
- 用带有内部轴向位移功能的轴承：圆柱滚子轴承N、NU、NJ



35：两个深沟球轴承的固定-浮动配置。

a：在工作端的深沟球轴承作为定位轴承，在驱动端的深沟球轴承作为浮动轴承。

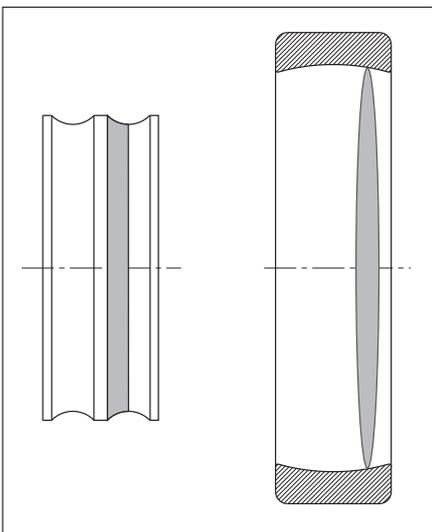
b：正常工作下的轴承轨迹。定位轴承的轨迹显示出的是承受联合载荷的轴承特点，浮动轴承的轨迹表明承受纯径向载荷或者主要承受径向载荷。

c：在轴向有害预载下的轴承轨迹（浮动轴承的外圈不能移动）。每个轴承的轨迹都显示出联合载荷的特点。两个轴承对称的轨迹表明存在有害的轴向预载。

36：轴向过载引起的调心球轴承外圈一列滚道上的剥落。



37：承受径向载荷且轴向过载时内圈旋转的调心球轴承的轨迹



对拆下的轴承评估运转特性和损坏情况

滚动接触模式

• 不对中的轨迹

现象：

对球轴承来说，静止套圈的载荷轨迹不是竖直的，而是在轴线方向出现倾斜，见图38和39。对滚子轴承来讲，在倾斜状态下滚道一侧的轨迹要比另一侧清晰，见图40。

原因：

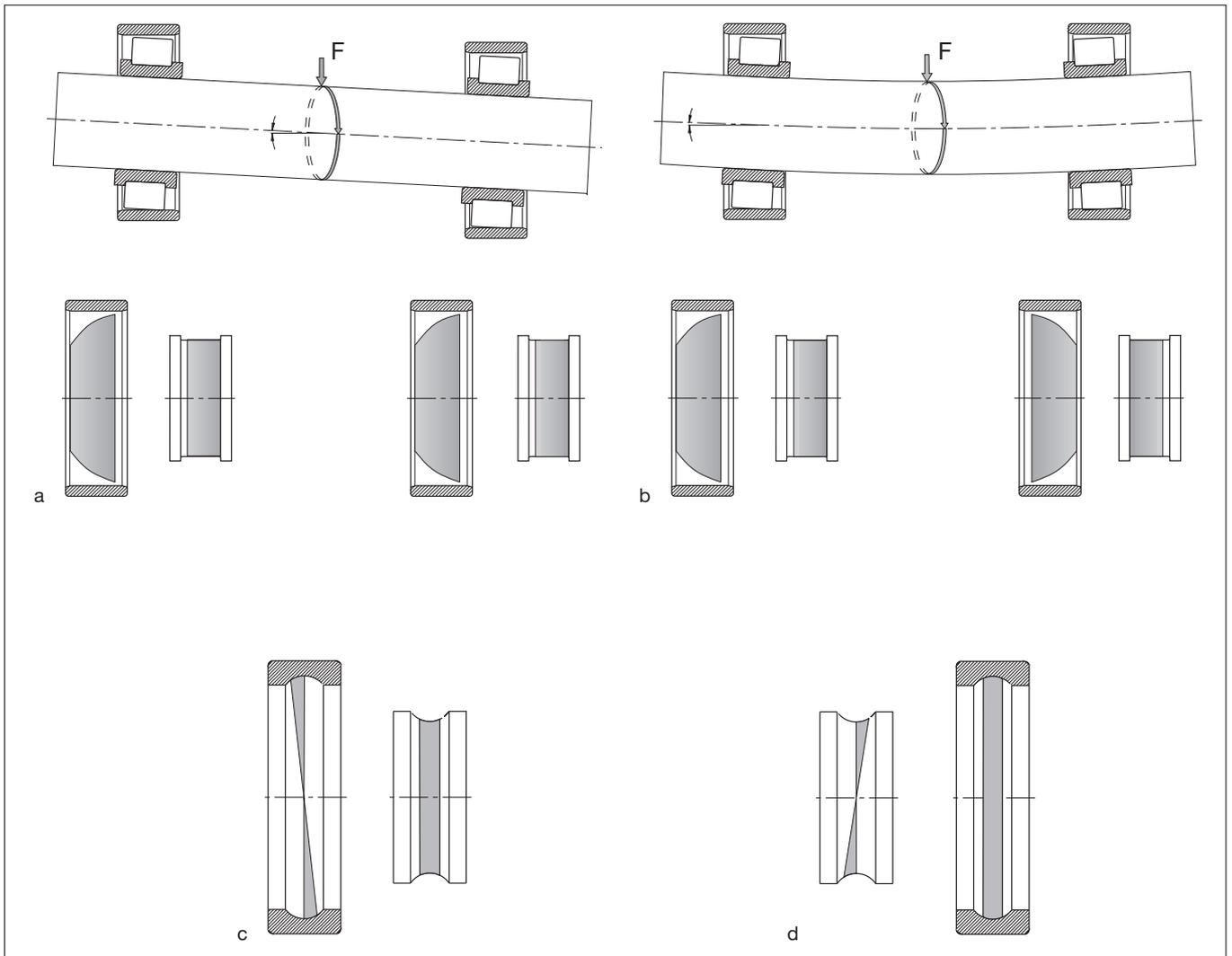
- 轴挠曲
- 剖分式轴承座或立式轴承座不对中
- 相邻结构的两表面不垂直
- 在安装时相邻表面和轴承套圈间有污物
- 同时承受力矩和载荷的轴承游隙太大

补救措施：

- 参考允许倾斜度的安装说明，见FAG样本
- 保证安装时的清洁度
- 轴承游隙要合适

38：不对中轴承

- a：轴承座不对中时，内圈相对外圈的倾斜
- b：轴挠曲时，两内圈相对偏斜
- c：不对中时内圈旋转的深沟球轴承的轨迹
- d：不对中时外圈旋转的深沟球轴承的轨迹



对拆下的轴承评估运转特性和损坏情况

滚动接触模式



39：深沟球轴承内圈滚道上的倾斜轨迹

3.3.2 滚道和滚动体表面的凹痕

失效轴承部件的滚动接触区经常会出现凹痕，凹痕的产生可能源于多种原因。如果这些凹痕是大量的并且均匀分布，那么分析轨迹时（3.3.1章节）要考虑是否是由外界微粒在轴承里的循环运动造成的。以下内容主要与套圈有关。

40：圆锥滚子轴承内圈滚道上的倾斜轨迹



3.3.2.1 断裂

轴承在循环运动时，滚道和滚动体的材料受到持续的交变应力。所以失效模式近似于配合件在弯曲应力下的疲劳：疲劳断裂的扩展。在滚动轴承中这些断裂区域很大程度上沿滚道表面平行发展并最终导致表面剥落，也可称为：疲劳失效、表面剥落、凹坑、点蚀、微观凹坑等等。

对拆下的轴承评估运转特性和损坏情况

滚动接触模式

• 典型疲劳

即使在很好的运转条件下，即：具有弹性流体动压润滑油膜、最好的清洁度和最适宜的温度，此时轴承零件也能够发生和载荷有关的疲劳失效。如果当量载荷大于疲劳极限载荷 C_u 时，在此状态下长时间运行后，会形成疲劳破坏。疲劳极限载荷 C_u 值见样本中的轴承尺寸表。这种由次表面裂纹引起的典型疲劳破坏很少发生。由于润滑不良或清洁度引起的滚动接触表面的疲劳失效经常发生。当破坏进一步扩展后，失效原因就很难被查明。

现象：

滚道和滚动体的次表面裂纹、材料剥落（相对深的凹坑）、滚道上未破坏部分表明在破坏初期润滑良好（见图23）。然而随着破坏的加剧，有凹痕的旋转件（见图31）会出现越来越多的凹坑，见图41到43。



41：通过深沟球轴承内圈滚道上的点蚀可判断的典型疲劳。疲劳进一步扩展，整个滚道上出现材料剥落。



42：深沟球轴承上的进一步的疲劳破坏

43：圆锥滚子轴承外圈滚道上的疲劳破坏



对拆下的轴承评估运转特性和损坏情况

滚动接触模式

• 外界微粒循环运动引起的疲劳

当在轴承里有粗糙的杂质时，疲劳寿命会大大降低，见图44。在实际应用中，由外界微粒造成的失效的危害程度与外界微粒的硬度、尺寸、数量以及轴承尺寸有关。就疲劳来说，球轴承对杂质的敏感程度要大于滚子轴承，小滚动体的轴承比大滚动体的轴承要敏感。外界微粒形成的凹坑会对滚动材料产生重要影响。特别是在应力下的旋转运动对初始裂纹有很大影响，SEM图在第4章节。

现象：

材料剥落；外界微粒形成的凹坑在滚动方向上V形发展(V形凹坑)，图45。

原因：

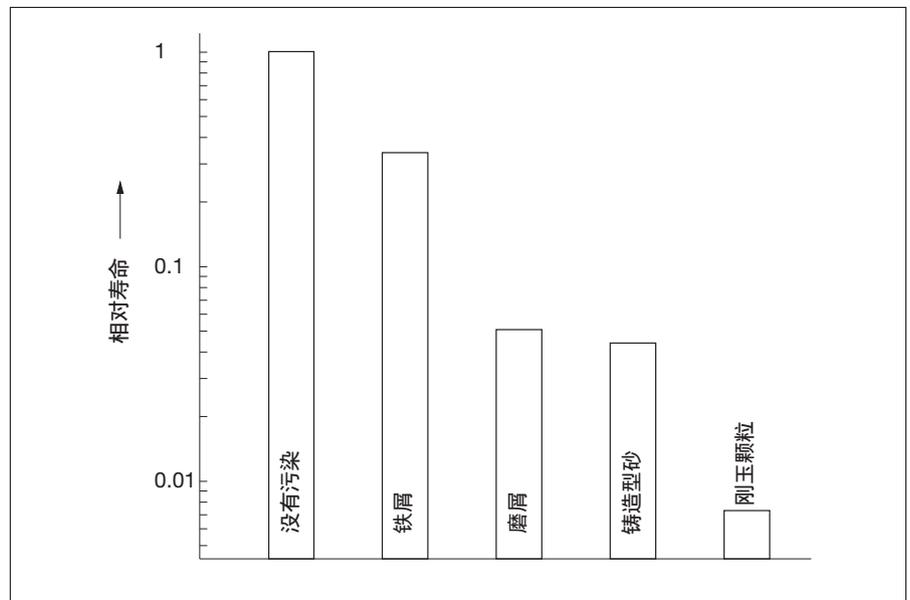
剥落的滚道材料和，硬质颗粒（铸造砂，磨粒）造成的凹坑尤其危险。

补救措施：

- 彻底清洗轴承座等部件，如有必要，涂层
- 当安装时，要求清洁和谨慎

- 改善密封
- 使用防尘的轴承结构
- 润滑剂的清洁度很重要
- 在投入使用前要清洁过滤设施

44：不同污物对寿命的降低

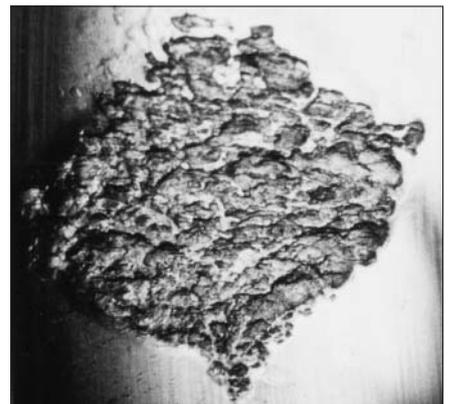


45：由外界微粒造成的凹坑在运动方向发展成V型而造成的疲劳破坏

a：检查时发现的破坏

b：运转大约1000小时后的破坏

c：运转大约1200小时后的破坏



对拆下的轴承评估运转特性和损坏情况

滚动接触模式

• 由于静载荷过大造成的疲劳

由于静载过大造成的凹坑与外界颗粒造成的凹坑类似，其翻起的边缘会导致失效。

现象：

在初期，以滚动体间距分布的凹坑经常只分布在部分圆周上，最终导致裂纹出现。

这种情况有时只发生在一个套圈上。经常与滚道中心不对称。

原因：

- 静载过大，冲击载荷
- 通过滚动体传递了安装力

补救措施：

- 根据安装指南操作
- 避免过载和过大的冲击载荷

• 由于不正确安装造成的疲劳

现象：

对于角接触球轴承来讲，在靠近小挡边处的非接触区有疲劳，见图46。

原因：

- 调整不当
- 轴向接触不足或锁紧螺栓没有锁紧
- 径向过盈太大

补救措施：

- 保证周围部件的刚性
- 正确的安装

46：由于调整不当，使得角接触球轴承内圈沟底有疲劳破坏



• 由于不对中造成的疲劳

现象：

- 轨迹偏离轴承中心，见图40
- 在滚道/滚动体边缘上有疲劳，见图47
- 在整个或部分表面由塑性变形引起的周向凹槽，因此边缘光滑。在极端情况下，凹槽的底部会有裂缝，见图48。

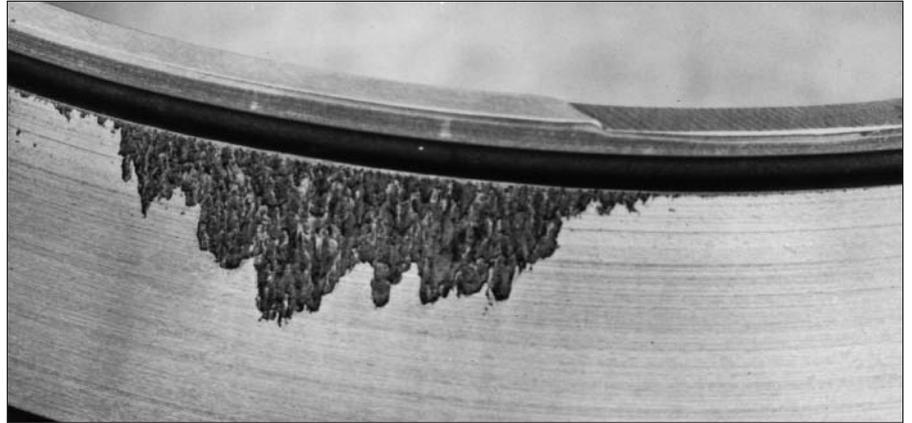
原因：

由于轴承座的不对中或轴的挠曲，内圈相对外圈倾斜并导致大的力矩载荷。对球轴承来讲，这导致了在保持架兜孔中(章节3.5.4)的作用力，在滚道上出现更多的滑动以及使球在滚道的边缘运行。对滚子轴承来讲，滚道是不对称受载，当套圈倾斜的很严重时，滚道和滚动体的边缘会承受载荷，并出现应力集中现象。请参阅3.3.1.2章节的“不对中轨迹”。

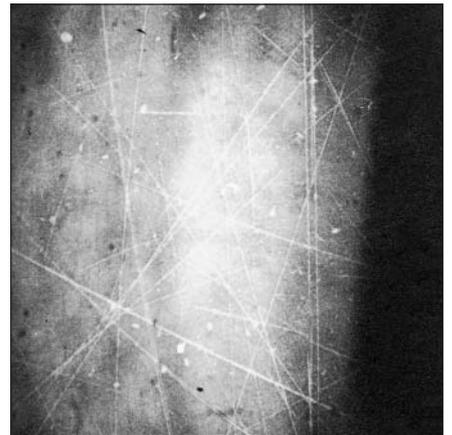
补救措施：

- 使用调心轴承
- 减小不对中
- 提高轴的强度

47：由于不对中造成局部过载的圆锥滚子轴承滚道边缘发生疲劳。



48：球轴承滚道边缘发生疲劳，比如有高的力矩载荷（边缘运行）；左图为滚道边缘，右图为球。



对拆下的轴承评估运转特性和损坏情况

滚动接触模式

• 由于润滑不良造成的疲劳

现象：

不同的载荷在润滑不良的状况下会出现不同的破坏形式。当载荷低并有打滑时，会发生细微的表层剥落。因为它们数量多，而且看起来像是滚道上的麻点，见图49。我们用点蚀来描述。当载荷很大并且润滑油膜变薄时，比如有水侵入，滚道（图29）受压力抛光时，会出现贝状的凹坑，见图50。

当载荷很高而且润滑很差时，在滚道上会出现非常明显的受热区域，继续运转后，就会出现初始裂纹。

原因：

- 以下原因引起润滑不良：

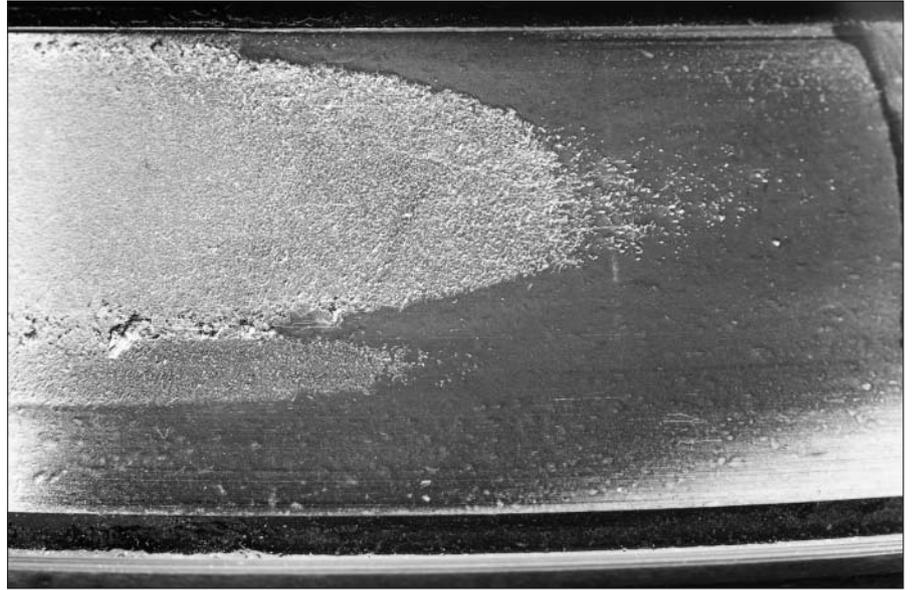
- 润滑剂供应不充分
- 工作温度太高
- 有水侵入

在滚道表面引起过多的摩擦和材料应力

- 有时存在打滑

补救措施：

- 增加润滑剂量
- 使用高粘度的润滑剂，并且尽可能采用测试过的EP添加剂
- 冷却润滑剂/轴承
- 尽可能用更软的润滑脂
- 防止水的侵入



49：微观点蚀



50：贝状的疲劳

对拆下的轴承评估运转特性和损坏情况

滚动接触模式

• 由于磨损造成的疲劳

现象：

比如在圆锥滚子轴承的滚动体上有剥落，见图51和52。带状轨迹，见图68。

原因：

由于润滑剂受到污染，比如密封破坏导致外界微粒进入，造成轴承零件在滚动接触区域磨损从而导致该零件几何形状改变。造成局部过载的结果，部分也与圆锥滚子轴承调整不当有关。

补救措施：

- 及时更换润滑剂
- 过滤润滑油
- 改善密封
- 及时更换破损密封
- 对套圈和滚子进行特殊的热处理

• 硬化层断裂的疲劳

现象：

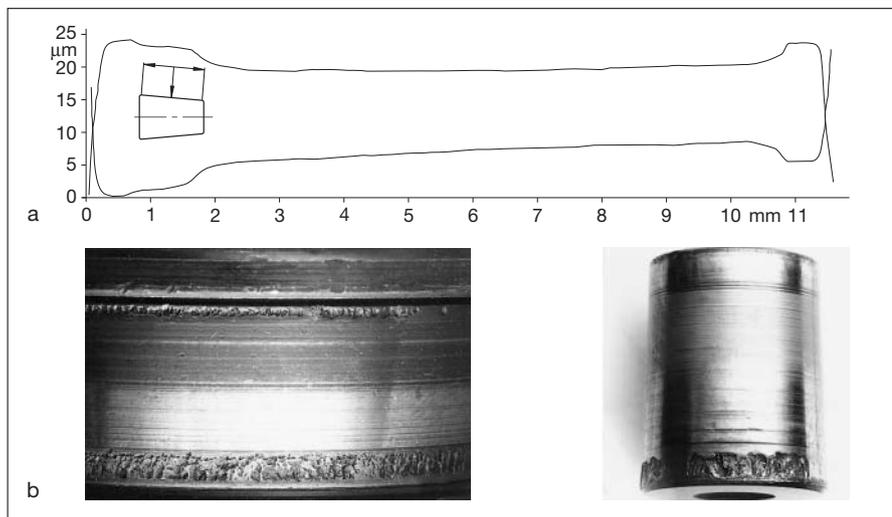
表面硬化的轴承部件，滚道大块剥落。

原因：

- 硬化层的开裂或分离
- 载荷太大或给定载荷下的硬化层的深度不足，比如由于错误的设计载荷

补救措施：

- 调整硬化层的深度以适应载荷状况
- 避免过载



51：不同区域的磨损能改变零件接触区的几何形状，以至局部过载导致了疲劳失效

a：滚子的横截面轮廓；

b：有疲劳破坏的内圈滚道和滚子。



52：疲劳机理如图51，滚道边缘有磨损、滚子横截面轮廓见图69。

对拆下的轴承评估运转特性和损坏情况

滚动接触模式

3.3.2.2 腐蚀破坏

- 由于潮湿造成的腐蚀（生锈）

现象：

整个轴承表面有褐色变色，通常以不均匀分布的小凹坑的形式出现，图53。

在许多情况下，有许多锈点以滚动体的间距分布（静态腐蚀）。当轴承长期静止时，毛细现象能使湿气汇聚在接触区，见图54。这将导致此后的磨损和在锈点处早期失效。

原因：

- 在仓库中储存不当（相对空气湿度 > 60 %）
- 温度的剧烈变化（湿气冷凝）
- 密封失效（因灰尘的研磨作用而加速，图87）
- 不适合的润滑剂

补救措施：

- 根据滚动轴承制造商的说明书进行适当地储存
- 改善密封（尽可能添加额外的防护）
- 使用带有防锈蚀剂的润滑剂
- 对使用润滑脂的轴承要经常进行再润滑，特别在长时间停机前



53：锈蚀的深沟球轴承外圈，其防锈保护被湿气破坏

54：在滚道上以滚动体间距分布的腐蚀凹痕



对拆下的轴承评估运转特性和损坏情况

滚动接触模式

- 由于侵入介质造成的腐蚀

现象：
通常是黑色的腐蚀凹痕，见图55。

- 原因：
- 在仓库中不恰当的储存（在同一地方储存了侵蚀性化学物质）
 - 密封失效
 - 不适合的润滑剂

补救措施：

- 按照滚动轴承制造商的说明书进行储存
- 改善密封
- 使用带有防锈性能的润滑剂

55：由于侵入性介质造成的表面破坏。腐蚀的凹痕经常是黑色的。



对拆下的轴承评估运转特性和损坏情况

滚动接触模式

3.3.2.3 假性布氏压痕

现象：

在滚道表面上有以滚动体间距分布的压痕，图56和57。不是由于不正确的安装造成的（见3.3.2.4章节的“滚动体凹坑”）。压痕表面经常是褐色的（腐蚀），对球轴承来讲特别粗糙（加工表面被破坏）。可以发现球轴承轴向方向的划痕。当轴承偶尔转动时，就会出现几道假性布氏压痕。

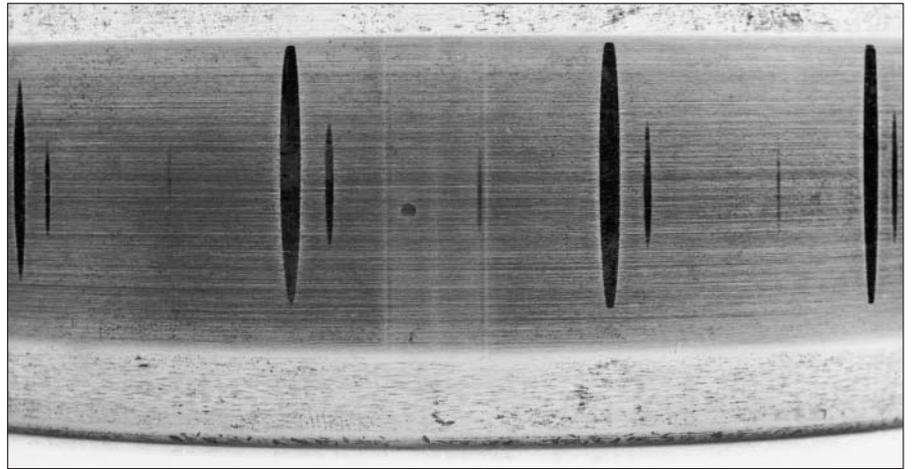
原因：

静止机器的振动能导致部件在滚动接触区的微小运动。

补救措施：

- 消除或吸收振动
- 避免敏感机器长时间静止，要保持运行；在运输过程中使用安全的设备使轴承卸载或加预载。
- 使用合适的润滑剂（添加剂）。
- 对旋转载荷选择较大的径向游隙。

56：圆柱滚子轴承的内圈上有以滚动体间距分布的假性布氏压痕。



57：球轴承的假性布氏压痕



3.3.2.4 滚动体表面的凹痕

现象：

不可分离轴承的滚道上有以滚动体间隔分布的凹坑，见图58。疲劳有时从这些地方开始，参见“过静载造成的疲劳”的3.3.2.1章节。

这些凹坑也可能是在拆卸时产生的：检查运转特性（光亮边缘），确定安装方向。

原因：

- 静载荷过载/冲击载荷
- 通过滚动体传递安装或拆卸力(不正确的安装次序,不合适的辅助设备)

补救措施：

首先安装紧配合的套圈。当两个套圈都有紧的安装配合时，用合适的安装盘将它们一起安装。

58：深沟球轴承挡边上的球状凹坑。安装工具与松配合的套圈接触，因此通过球传递装配力。



对拆下的轴承评估运转特性和损坏情况

滚动接触模式

3.3.2.5 由于过电流造成的凹坑和凹槽

• 凹坑

现象：
在滚道接触区有局部融化形成的凹坑，有时在一列上有几个凹坑或在整个周向有链状的凹坑。凹坑表面类似于点焊，见图59。

原因：
电流造成火花，比如在焊接时或由于接地装置失效

补救措施：
在电焊（接地）时避免电流直接通过轴承。

• 凹槽

现象：
在滚道上很大一部分或整个滚道的圆周方向有很多平行于轴线的褐色凹槽，见图60。

原因：
交流或直流电持续通过，甚至低电流也能引起痕迹。

补救措施：

- 防止电流通过轴承（接地，绝缘）。
- 使用绝缘轴承。

59：电流火花放电形成的圆柱滚子轴承滚道上的凹坑。



60：深沟球轴承外圈滚道上的凹槽由持续通过的电流造成。



3.3.2.6 滚动体边缘运行

现象：
球表面上有圆弧形压痕或称为“毛线球”状压痕，而且由于塑性变形出现边缘圆滑，见图61，62。对滚子来说，周向压痕靠近端面。不要与由外界微粒形成的划痕混淆，见3.3.4.2章节“滚动体外表面上的划痕”。

原因：

- 过载（轴向）
- 力矩载荷太大
- 工作游隙太大
- 倾斜

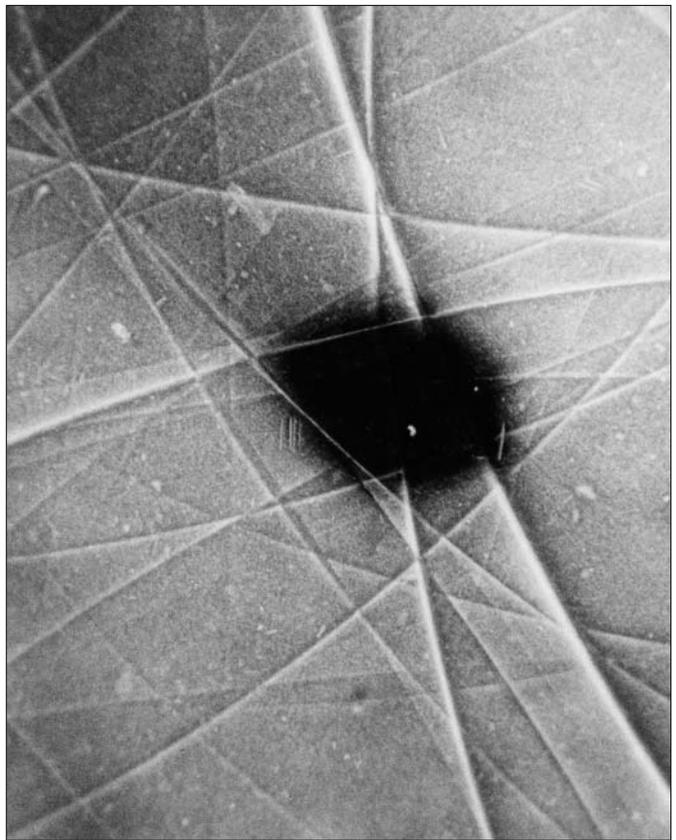
补救措施：

- 避免过载
- 使用高承载能力的轴承
- 减小工作游隙
- 避免倾斜

61：长期持续载荷造成的球表面的边缘痕迹



62：球表面上由长期变化载荷形成的“毛线球”状压痕



对拆下的轴承评估运转特性和损坏情况

滚动接触模式

3.3.3 套圈断裂

3.3.3.1 由于滚道疲劳引起的断裂

现象：

通常呈大面积的滚道疲劳破坏；经常在断裂区域是台阶状（有时是线状），见图63

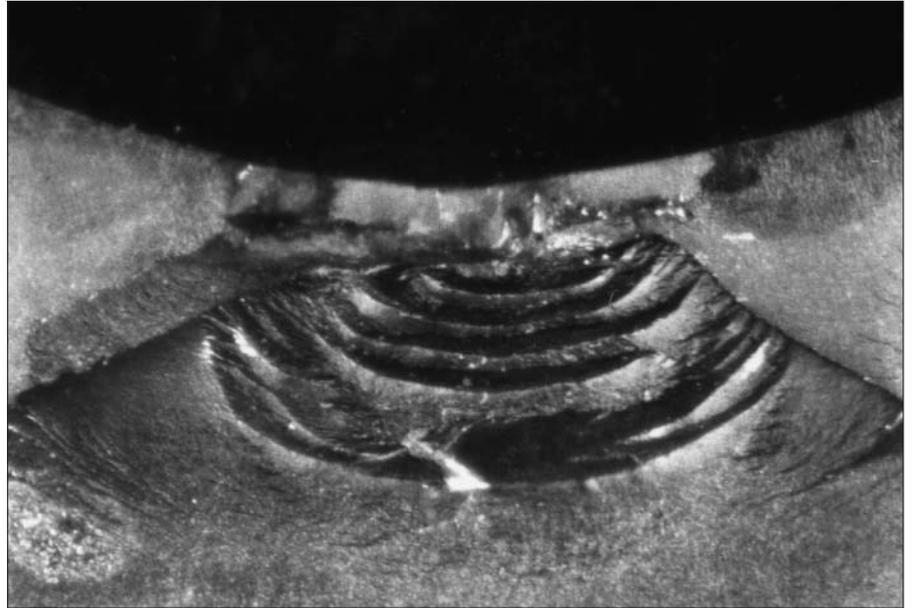
原因：

进一步发展的疲劳破坏

补救措施：

见3.3.2.1章节“断裂”

63：深沟球轴承外圈轴向断裂导致的失效



3.3.3.2 内圈的轴向原始裂纹和内圈通裂

现象：

套圈部分或整个在轴向方向有断裂。略微圆滑的断口：表明在运转中产生断裂并且继续运转。尖的断口表明是在拆卸过程中产生的。带裂纹的轴承长期运行后，尖的断口边缘会部分剥落，见图64。

原因：

- 轴承打滑
- 滚道断裂
- 内圈在轴上转动
- 不适合的润滑
- 与轴配合太紧
- 轴表面有沟槽
- 圆度不够
- 与周边部件刮擦

补救措施：

- 改善润滑（添加剂，增加润滑油量）
- 针对滚道破坏的补救措施

- 选择合适的配合
- 避免周围部件的刮擦
- 提供更好的配合面
- 套圈的特殊热处理

64：调心滚子轴承内圈轴向通裂



3.3.3.3 外圈周向断裂

现象：
通常裂纹在圆周方向发展。经常断裂成几块。在轴向载荷下，这些断裂常发生于偏离滚道中部的区域。通常疲劳是破坏的原因。外圈外表面一般表现出不正常的承载形式，见图65。

原因：
与轴承座相配合的套圈支撑不足

补救措施：
改善支撑情况

65：外圈有圆周方向的断裂



对拆下的轴承评估运转特性和损坏情况

滚动接触模式

3.3.4 接触表面上的深度擦伤和拖痕

除了局部断裂、裂纹和其它在滚道或滚动体表面的凹坑，经常有由轴承滑动导致磨损而产生的大面积表面破坏。除了使用工况，破坏程度本质上受润滑剂的粘度和清洁度影响。

66：磨损、粗糙的滚道

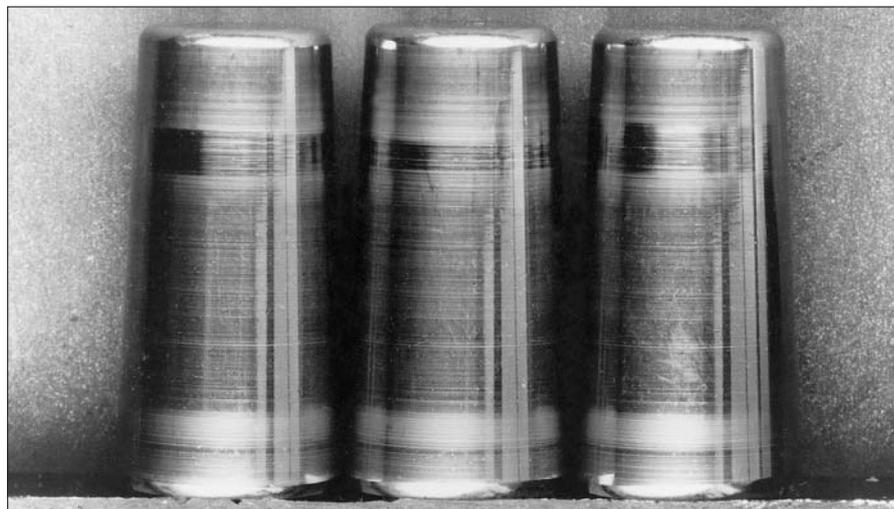


3.3.4.1 润滑不良造成的磨损

现象：

接触表面是灰暗和粗糙的，见图28和66。研磨物质使润滑剂的颜色变深；当使用黄铜保持架时，润滑剂的颜色变黄。润滑脂也会硬化。然而在许多情况下，潮湿使润滑剂的稠度降低，变得稀薄。磨损导致预载降低或轴承的游隙变大。如果外界颗粒是磨损的原因，滚动体表面会有严重的划痕，见图67。在不良的条件下，滚动轴承的滚道在它们的周向上会有不均匀的磨损。滚道表面是条纹状的，见图68和69。这种磨损导致疲劳破坏，请参考3.3.2.1章节“磨损造成的疲劳”。

67：首先会在滚动体表面探测到磨损痕迹



原因：

- 不能承载的润滑油膜
- 润滑剂的污染（细小的硬质颗粒比如灰尘，或水）
- 圆锥滚子轴承调整不当而导致不均匀磨损

对拆下的轴承评估运转特性和损坏情况

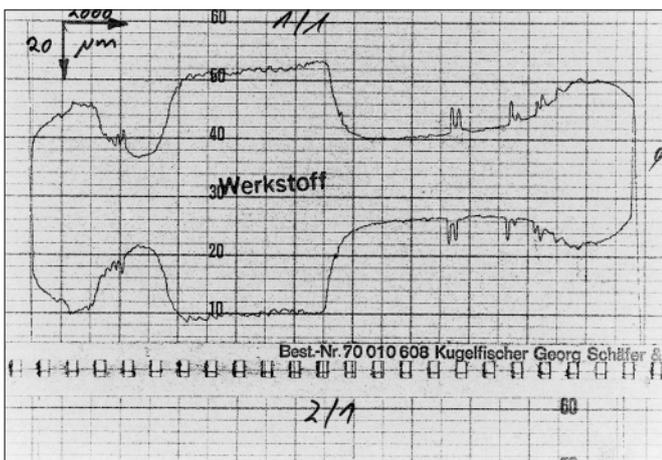
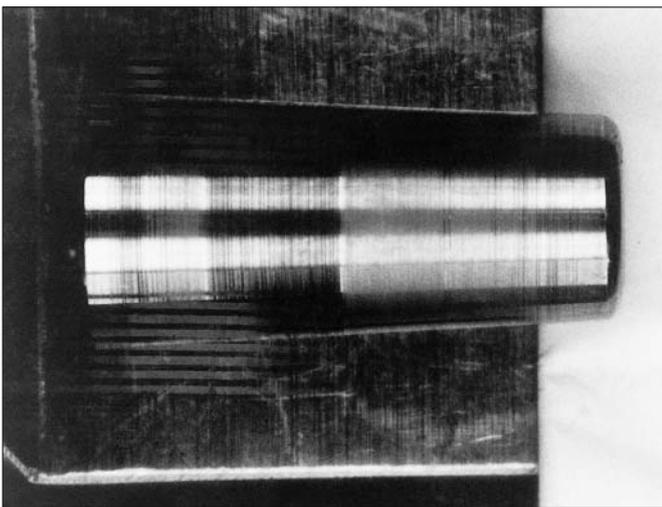
滚动接触模式

补救措施：

- 用更高承载能力的润滑剂，比如用更高粘度的润滑剂或使用EP添加剂
- 缩短润滑剂更换周期
- 改善密封
- 过滤润滑剂
- 确保轴承的正确调整

68：在某些区域因磨损形成带状痕迹。

a：滚子



b：滚道



69：图68a的轮廓图

对拆下的轴承评估运转特性和损坏情况

滚动接触模式

3.3.4.2 滚动体外径上的擦伤

现象：

在滚动体接触区的周向凹痕。在滚子上有平行的周向痕迹，见图70和71，对球来讲经常呈现“毛线球”现象，见图72。不要与边缘痕迹混淆（见3.3.2.6章节）。边缘运行形成的轨迹边缘因塑性变形是平滑的，而擦伤有尖的边缘。硬质颗粒经常嵌入保持架兜孔中，从而产生擦伤，见图73。

原因：

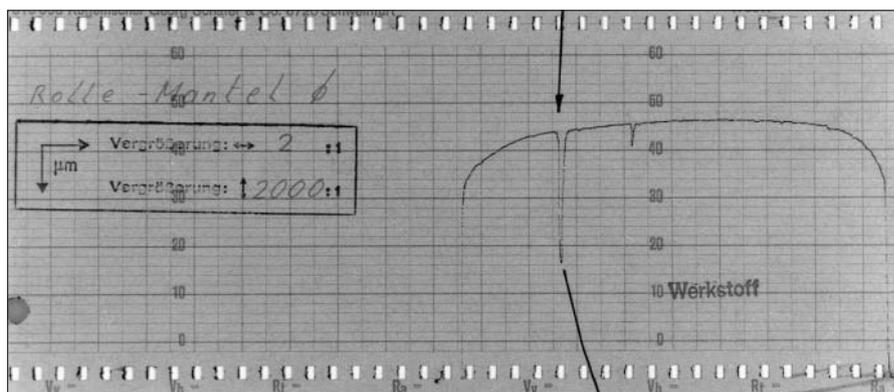
污染的润滑剂；硬质颗粒嵌在保持架兜孔，其作用就像是砂轮上的磨粒

补救措施：

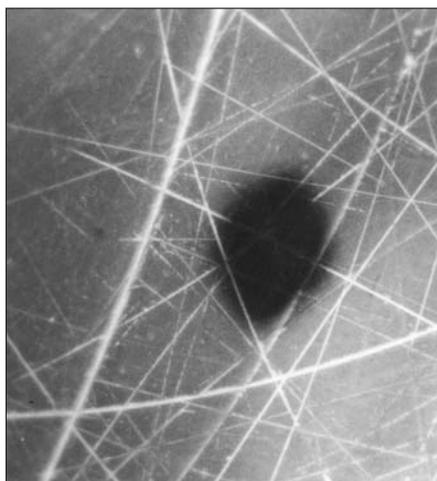
- 保证清洁的安装条件
- 改善密封
- 过滤润滑剂



70：保持架上的外界颗粒造成的滚动体上的深度擦伤

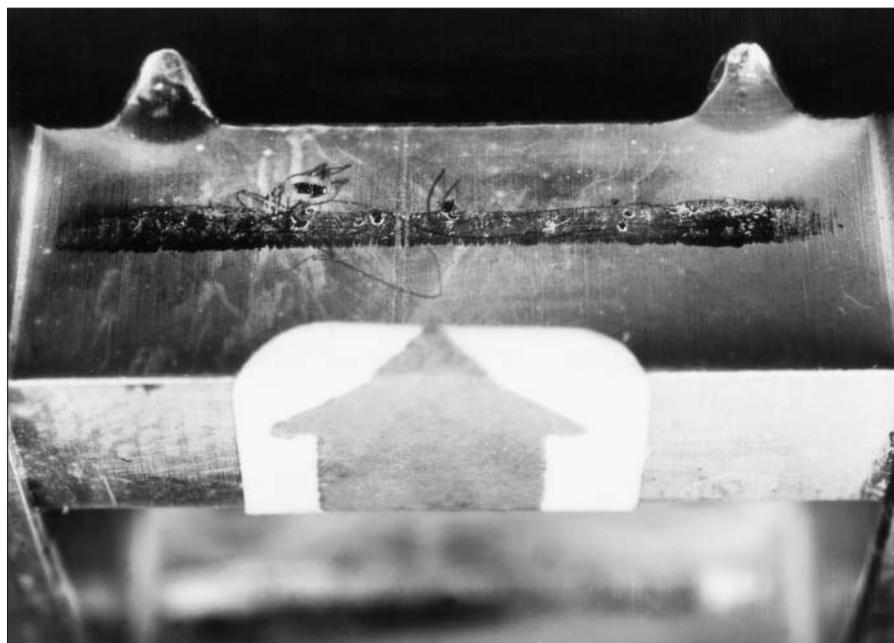


71：图70的图表



72：在球表面的擦伤像是毛线球

73：圆柱滚子轴承保持架横梁上嵌入的外部微粒



3.3.4.3 打滑痕迹

现象：

滚动体打滑，特别是大型和重型滚子，比如满装轴承。打滑使滚道或滚动体变得粗糙。材料经常有堆积且伴有拖痕。通常不是均匀分布在表面上而是呈点状，见图74和75。经常发现有微小的点蚀，参见“润滑不良造成的疲劳”3.3.2.1章节。

原因：

- 当载荷过低和润滑不良时，滚动体在滚道上打滑。有时也因为承载区太小，滚子在非承载区的保持架兜孔中迅速减速，在进入承载区时再急剧加速。
- 速度快速变化。

补救措施：

- 使用低承载能力的轴承
- 轴承预载，比如用弹簧
- 减小轴承游隙
- 空载时也要保证足够的载荷
- 改善润滑



74：圆柱滚子的打滑痕迹



75：圆柱滚子轴承内圈上的打滑破坏

对拆下的轴承评估运转特性和损坏情况

滚动接触模式

3.3.4.4 划痕

现象：

对于可分离的圆柱滚子轴承或圆锥滚子轴承，其滚动体和滚道上有和轴线平行且与滚动体等间距的材料缺失。有时在周向上会有几组痕迹。通常只在大约 $\frac{1}{3}$ 的周向而不是整个周向有此痕迹，见图76。

原因：

在安装单个套圈和带有滚动体的套圈时不对中而且互相挤擦。当移动质量大的组件时尤其危险（装有轴承内圈和滚动体组件的粗轴推入已装在轴承座里的外圈时）。

补救措施：

- 使用合适的安装工具
- 避免不对中
- 如可能，在安装部件时缓慢转动

76：圆柱滚子轴承内圈上的划痕是由于内圈装入滚动体组件时有倾斜



3.3.5 过热造成的损坏

现象：
轴承部件严重变色*)。滚道/滚动体塑性变形严重。温度急剧变化。轴承多次粘着，见图77。硬度低于58HRC。

原因：
通常不再检测由于过热导致的失效轴承。可能的原因：
- 轴承的工作游隙太小，特别是高速下的轴承
- 润滑不足
- 由于外部热源造成的径向预载
- 润滑剂过量
- 由于保持架断裂造成运转受阻

补救措施：

- 加大轴承游隙
- 如果有外部热源，要确保缓慢加热和冷却，也就是使整套轴承均匀受热
- 避免润滑剂堆积
- 改善润滑

*) 变色的说明：

当轴承呈现出回火颜色时与过热有关。呈现出的褐色和蓝色与温度高低和过热时间长短有关。这种现象与由于润滑油温度高而使其着色的现象很类似（见3.3.1.1章节）。因此不能仅从变色一项上来判断运转温度是否过高。从变色区域可以判断是由回火还是由油脂造成的变色：后者通常仅出现在滚动体和套圈的承载区，前者通常大面积地覆盖在轴承表面。然而，是否存在高温运转的唯一鉴定措施是硬度检测。

77：过热的圆柱滚子轴承的滚道上滚子留下了很深的胶着的压痕。



对拆下的轴承评估运转特性和损坏情况

挡边接触

3.4 挡边接触的评估

图78显示的是一个运行正常的挡边表面。

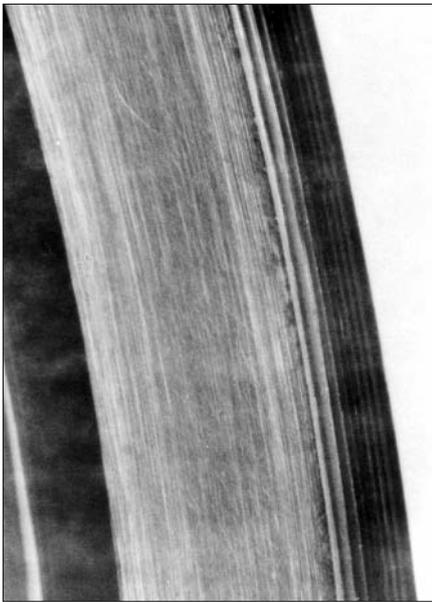
3.4.1 滚子轴承的挡边和滚子端面损坏

3.4.1.1 由外界颗粒造成的擦伤

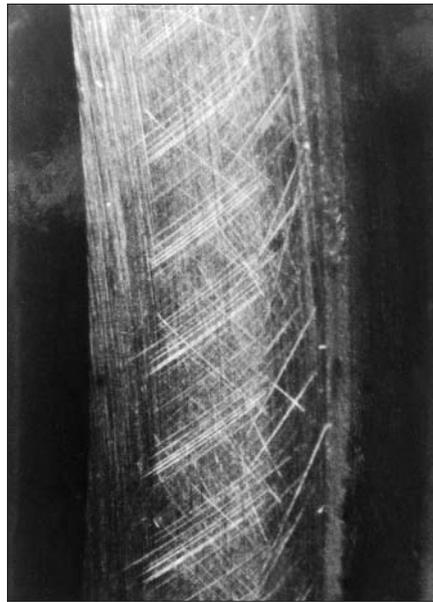
现象：
在挡边表面和滚子端面的（特别在圆锥滚子轴承里）圆弧形的擦伤，见图79和80。在挡边区域的擦伤深度与外界微粒嵌入的滚动体大端面轮廓半径有关。

原因：
润滑剂里的外界硬质颗粒进入了滚子端面 and 挡边的接触区域。

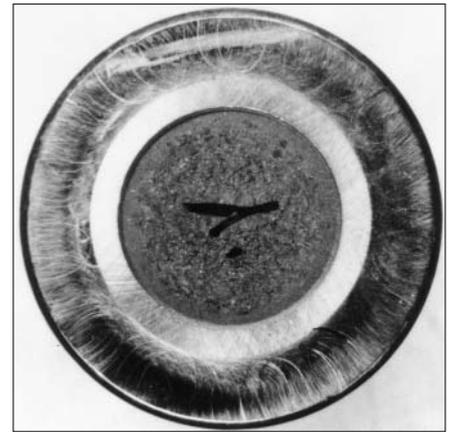
补救措施：
改善润滑剂清洁度。



78：圆锥滚子轴承挡边上的正常接触痕迹



79：由于外界微粒在挡边上造成的划痕



80：圆锥滚子端面上的划痕

3.4.1.2 挡边接触处的粘着

现象：

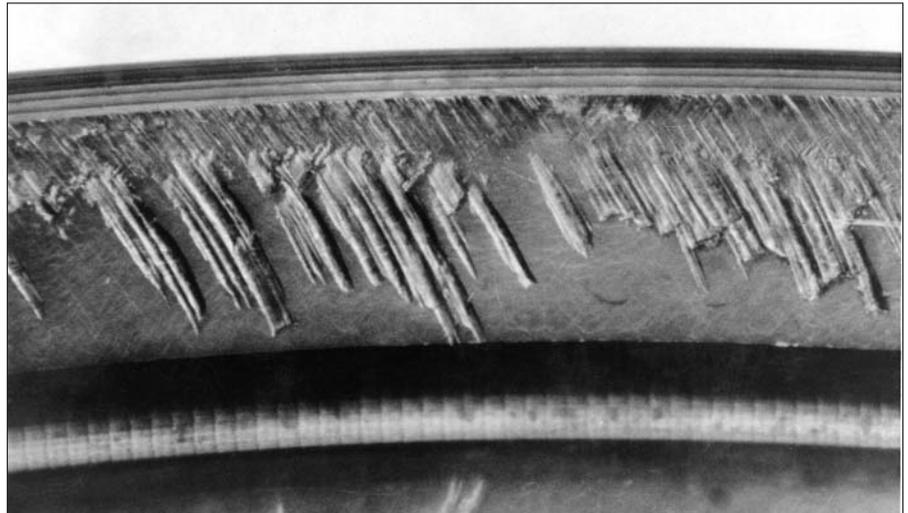
在挡边和滚子端面接触区域有部分或大面积的熔接和深的划伤，见图81和82。在这个区域也有润滑剂焦化。经常与载荷过高有关。

原因：

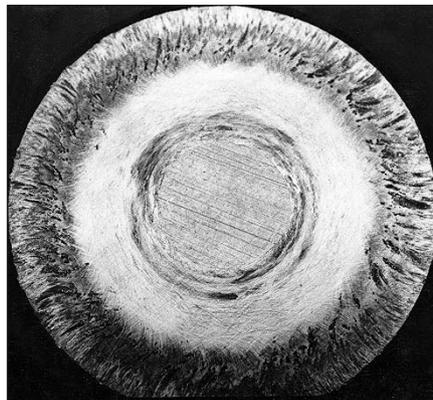
- 高载荷和高速下的不充足的润滑（润滑剂量太少或工作粘度太低）
- 高载和低速下的不充足润滑，在滚子端面和挡边间无弹性流体动压润滑油膜
- 圆锥滚子轴承的预载太高
- 由于热膨胀造成的过预载
- 比如由于滚道磨损、套圈倾斜或不充分的调整产生的滚子倾斜，见图81
- 圆柱滚子轴承的轴向载荷太高
- 因为配合表面的倾斜使内圈轴向载荷太高。

补救措施：

- 改善润滑（增加粘度，EP添加剂，增加润滑剂量）
- 确保轴承的正确调整



81：倾斜的滚子与挡边边缘接触时在挡边处引起的粘着



82：当润滑剂供应不充足和载荷太高时，在滚子端面和挡边处会引起胶合

对拆下的轴承评估运转特性和损坏情况

挡边接触

3.4.1.3 挡边接触区的磨损

现象：

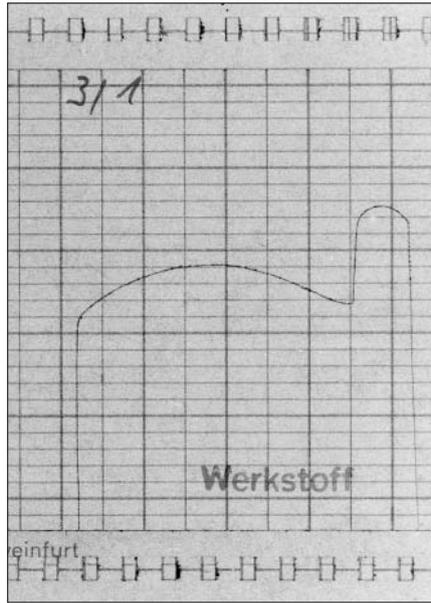
在滚动轴承中，润滑不良首先可以通过滚子端面/挡边的滑动来判断。在严重的情况下，会导致前面提到的胶着现象。然而，在所有的情况下，接触区域都会有磨损特性。这在滚子端面或挡边的横截面图表上能清楚看到，见图83。滚子端面经常有凸起。如果是圆锥滚子轴承，会导致预载降低或轴向游隙增加。比如在承受方向改变的载荷时将增大运行噪音。由于几何关系，对圆锥滚子轴承挡边接触区的磨损量会转换成约 $\frac{1}{3}$ 的轴向游隙。挡边磨损也能反映出滚道或滚子外径的磨损。

原因：

- 不适当的润滑（类型，数量）
- 污染的润滑剂

补救措施：

- 尽可能保证清洁
- 选择合适的润滑剂（粘度，EP添加剂）并确保供应充足



83：磨损的圆锥滚子端面轮廓图



84：圆锥滚子的凸起形成

3.4.1.4 挡边断裂

现象：
支撑挡边全部或部分断裂或碎裂，
见图85。

原因：
- 轴向载荷超出极限
- 挡边支撑不足，见图20
- 轴向冲击载荷

- 保持架和滚动体断裂引起的次级破坏
- 安装破坏

补救措施：
- 确保好的挡边支撑设计
- 载荷保持在设计的极限内
- 遵循安装指导

85：鼓形滚子轴承的挡边断裂。安装时直接用锤子敲击内圈



对拆下的轴承评估运转特性和损坏情况

挡边接触

3.4.2 保持架引导表面的磨损

现象：

当保持架 - 特别是黄铜保持架 - 被轴承套圈挡边引导时有磨损。表面经常很粗糙并有胶着（保持架材料粘在挡边上）。因为保持架一般不是和整个挡边接触，当有很多磨损时在挡边上呈现出台阶状，见图 86。相似的磨损特性也能在相关保持架的边缘发现，见章节 3.5.1。这种现象对外圈挡边引导的高速轴承来说更加严重。

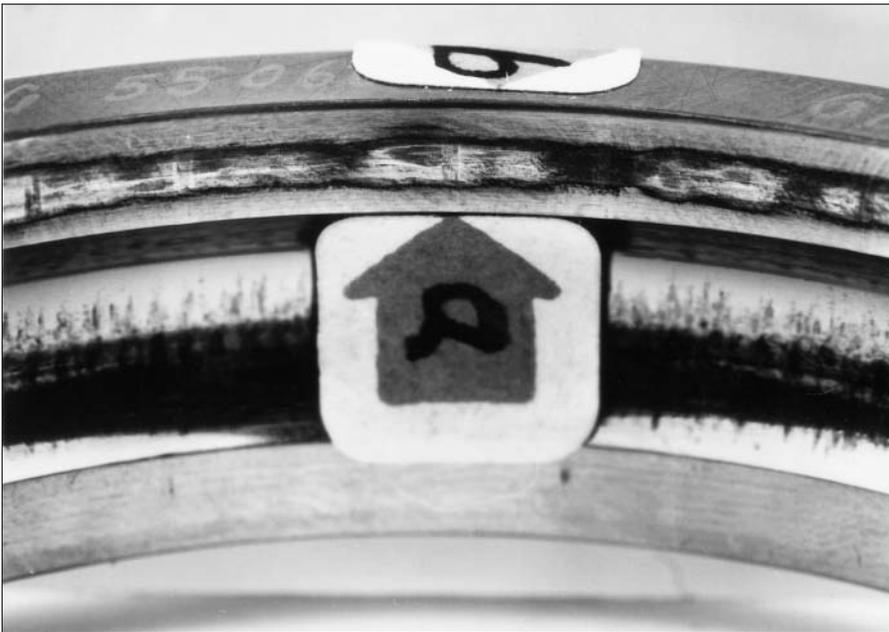
原因：

- 接触区域润滑剂供应不充分，经常是润滑剂的分布不合理
- 污染的润滑剂
- 轴承速度太高
- 安装时过度倾斜
- 工作温度过高时，使用外圈引导的黄铜保持架（钢/铜热膨胀不同）

补救措施：

- 改善润滑（大流量，更好的清洁度）
- 使用适合此工况的轴承
- 带涂层的保持架

86：在外圈挡边的保持架引导面上有不良的接触痕迹和材料拖痕



3.4.3 密封接触区的损坏

3.4.3.1 密封接触区的磨损痕迹

现象：

在挡边上的密封唇接触区会有圆周方向的凹槽，经常是亮的。因为污物的渗入，经常有密封唇的磨损和轴承的破坏。有些情况下能发现密封区域的腐蚀，见图87。

原因：

- 过多的外界污物，特别是在潮湿环境里。
- 唇口干运转。

补救措施：

- 增加密封，比如抛油环。
- 润滑密封唇。

3.4.3.2 密封接触区的变色

现象：

在密封唇接触区是褐色或蓝色，特别是轴密封的情况。过热导致密封的硬化和过度磨损，见章节3.6.1。

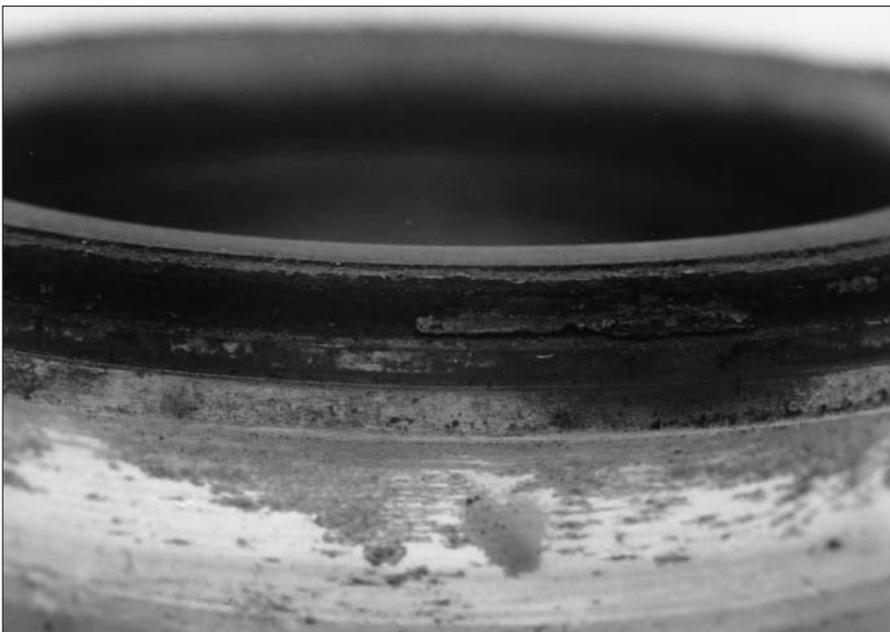
原因：

- 因为过盈或高的密封压入力，唇口和轴的接触区域有过热
- 密封唇接触区域无足够的润滑

补救措施：

- 润滑密封唇口
- 在密封效果允许范围内减少密封压力

87：角接触球轴承挡边上的密封区域腐蚀



对拆下的轴承评估运转特性和损坏情况

保持架损坏

3.5 保持架损坏

3.5.1 贫油和污染造成的磨损

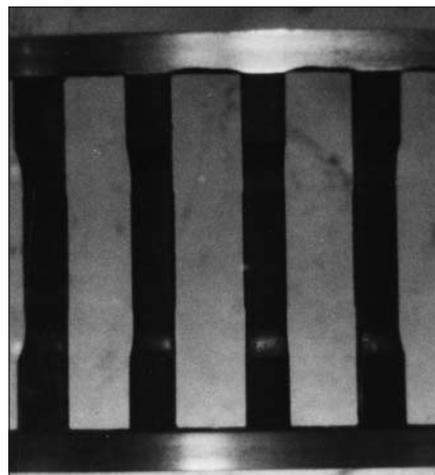
现象：
挡边引导的保持架在边缘磨损，由滚动体引导的保持架在兜孔处磨损。进一步的磨损导致滚动体引导变成挡边引导后继续磨损，反之亦然。磨损一般发生在轴向，大部分在兜孔处对称分布，或者对圆柱滚子轴承来讲是在两个侧面边缘上，见图88。

原因：

- 润滑脂被坚硬的外界微粒污染
- 润滑剂太少或不适合

补救措施：

- 确保清洁的装配条件
- 过滤润滑剂
- 增加润滑剂量/或使用合适粘度的润滑剂



88：保持架侧面磨损

3.5.2 速度过高造成的磨损

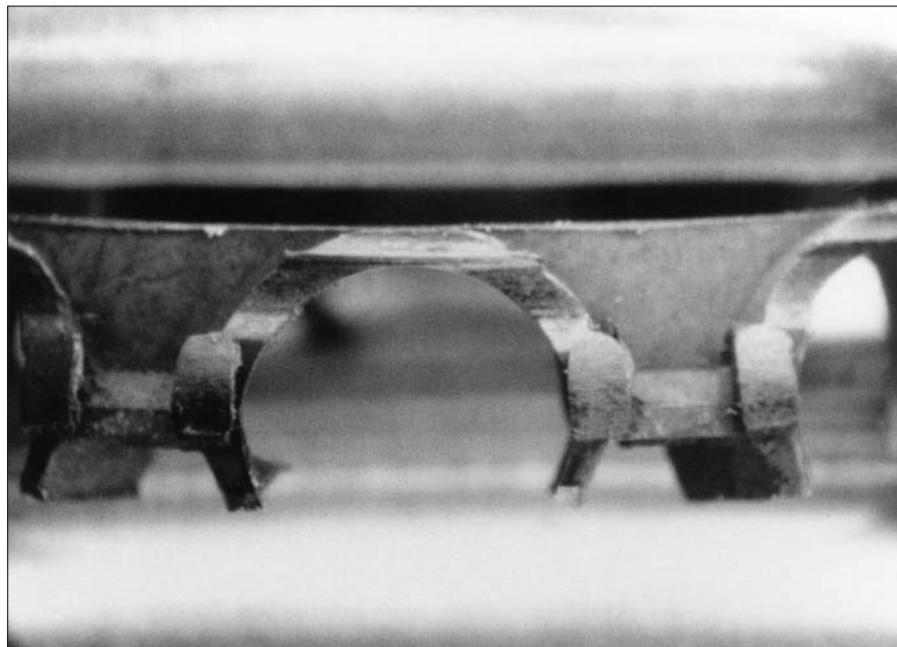
现在：
由于保持架外径与轴承外圈刮擦造成的磨损，见图89。

原因：

- 速度过高
- 选择了不合适的保持架结构

补救措施：

- 使用其它类型的保持架



89：由于保持架外径与轴承外圈刮擦造成的磨损

3.5.3 滚子偏斜造成的磨损

现象：

发生滚子歪斜的原因是当滚子轴承承载太低或严重倾斜，或者对圆锥滚子轴承来讲调整不当。如果挡边不足以承担歪斜力，由于不允许的高载荷而使磨损区域发生在保持架兜孔中对角方向。这会导致保持架的横梁断裂和侧边的进一步损坏，见图90。

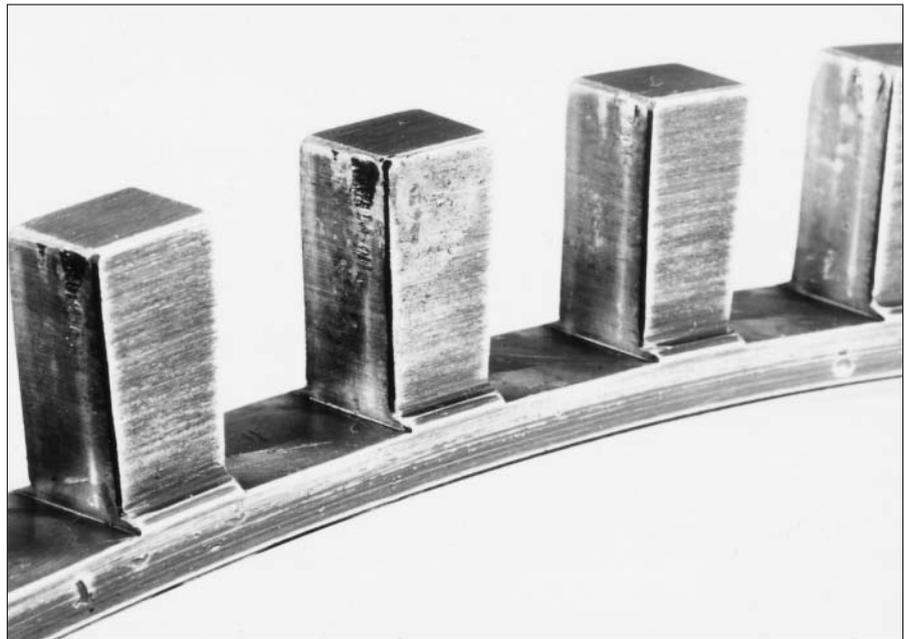
原因：

- 不允许的轴承倾斜，部分是由于不对中造成的
- 轴承游隙调整不当

补救措施：

- 正确调整轴承
- 用调心轴承，避免不对中

90：滚动轴承保持架兜孔的对角线方向磨损



3.5.4 倾斜引起的球轴承保持架磨损

现象：

保持架兜孔壁磨损严重，可能会发生变形或断裂，图91（与图38相比的痕迹）。

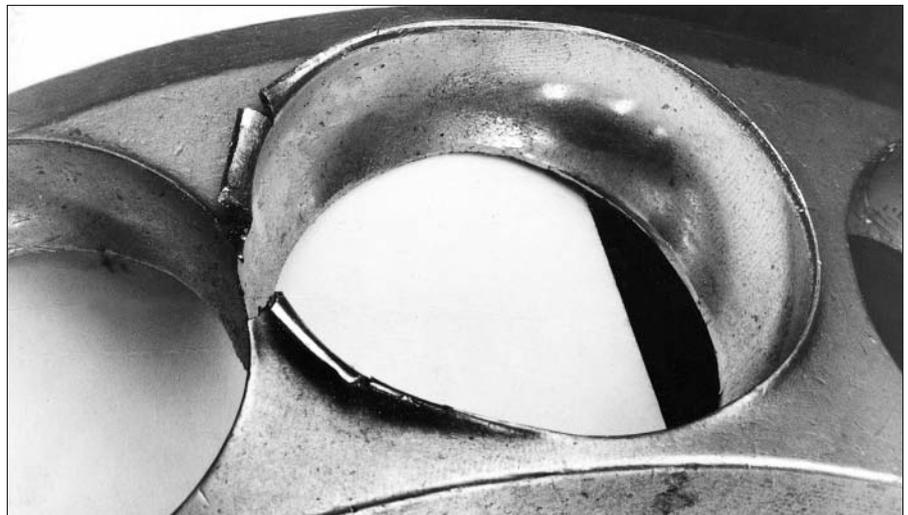
原因：

- 轴承套圈相互间过度倾斜，比如受联合载荷的球轴承。因此球有不同的周向速度。
- 在保持架区域的应力高，特别在润滑不良的状况下

补救措施：

- 尽可能避免倾斜
- 最好使用调心轴承或带尼龙保持架的轴承

91：轴承套圈的互相倾斜导致在球和保持架中有高的作用力，从而导致保持架兜孔壁断裂。



对拆下的轴承评估运转特性和损坏情况

保持架损坏

3.5.5 保持架连接部位断裂

现象：

- 铆接处变松，铆接处断裂（见图92）
- 保持架铆柱断裂

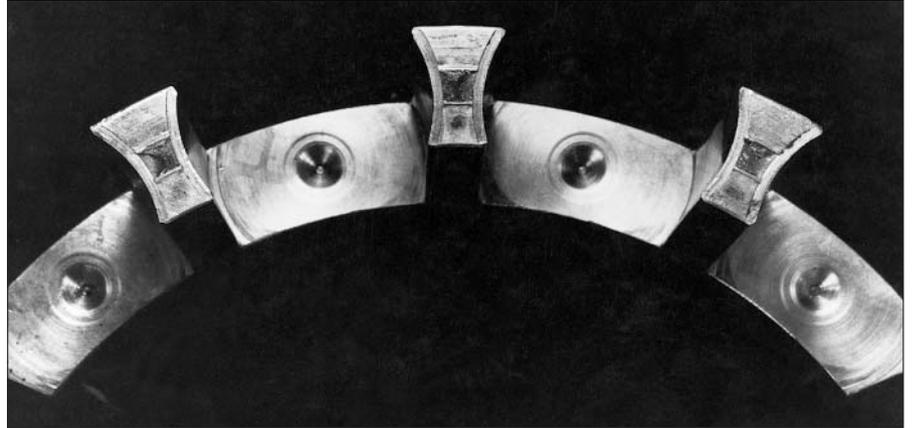
原因：

- 振动或冲击加大了保持架的应力，比如振动部件或车辆
- 深沟球轴承的倾斜

补救措施：

- 使用实体保持架而非冲压保持架
- 特别当应力很大时使用窗形保持架

92：因振动应力造成的保持架铆接处断裂。



3.5.6 保持架断裂

现象：

保持架侧边断裂（见图93），横梁断裂很少见

原因：

- 安装破坏
- 超过许可速度
- 磨损和润滑不良（见章节3.5.1）
- 力矩载荷太高或球轴承倾斜（见章节3.5.4）
- 配套的圆锥滚子轴承游隙太大，也有可能是轴向载荷方向转变太快

补救措施：

- 谨慎安装
- 过滤润滑剂
- 增加润滑剂量/或使用合适粘度的润滑剂
- 尽可能避免倾斜
- 尽可能使用预载的配对轴承

93：调心滚子轴承保持架侧边断裂



3.5.7 不正确安装造成的损坏

现象：
在塑料保持架中有凸起的初始熔点，金属保持架中有凹痕或变形，见图94和95。

原因：
- 安装时不正确的轴承加热
- 不合适的安装辅助工具

补救措施：
根据制造商的说明书安装（比如参考FAG出版物WL 80 100“滚动轴承的安装和拆卸”）。

94：熔化的塑料保持架由于在加热板上对轴承进行了不正确的加热



95：带凹坑的金属保持架



对拆下的轴承评估运转特性和损坏情况

密封损坏

3.6 密封损坏

3.6.1 密封唇的磨损

现象：

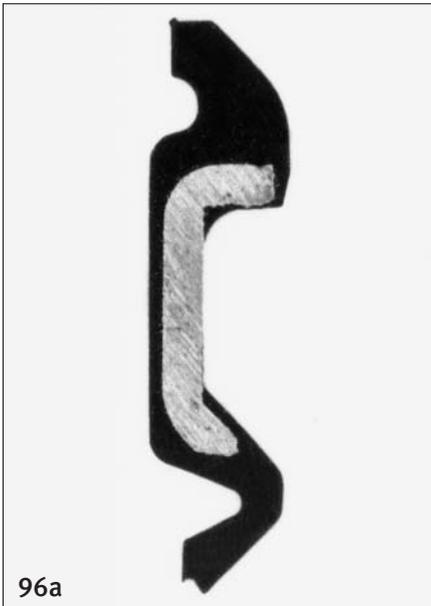
密封唇不再尖锐而是变宽。密封材料出现裂纹，密封唇口部分开裂，见图96，97。

原因：

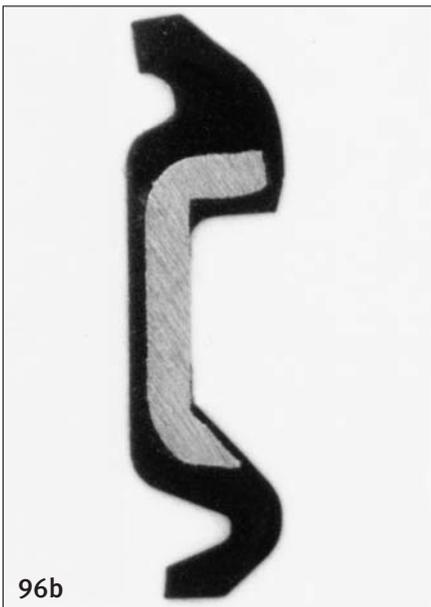
- 对密封材料来讲工作温度太高
- 在密封唇处有过多的灰尘
- 密封过盈太大
- 密封唇未润滑

补救措施：

- 采用合适的密封材料来满足工作温度的需要。
- 增加非接触防尘圈
- 密封唇预涂润滑脂。



96a



96b

96：密封的横截面。

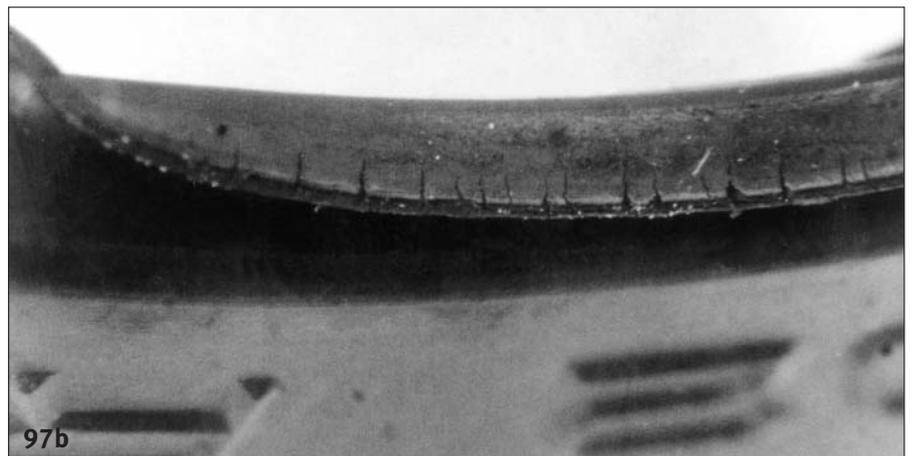
a：新密封唇；b：磨损的密封唇

97：a：有磨损和断裂的硬化的密封

b：密封唇口开裂



97a



97b

3.6.2 不正确安装造成的损坏

现象：

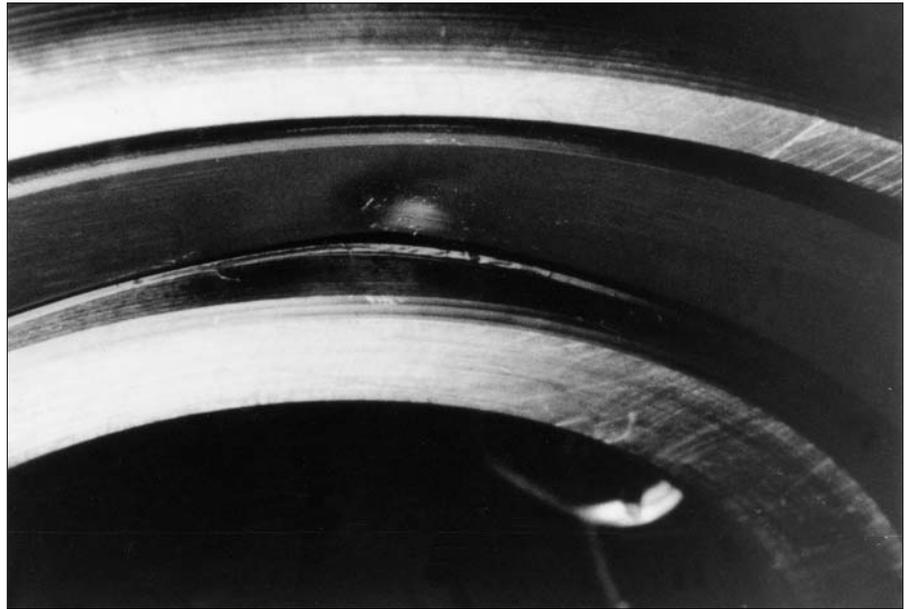
密封太靠内侧，有凹坑、变色、擦伤。密封唇翻起，见图98和99。

原因：

- 不正确的安装辅助手段
- 轴承加热温度太高
- 密封偶尔移动
- 使用压缩空气吹轴承

补救措施：

- 保证用合适的安装工具小心安装。
- 即使马上使用轴承也不能打开密封轴承。



98：带划痕的有凹坑的密封

99：翻卷的密封唇

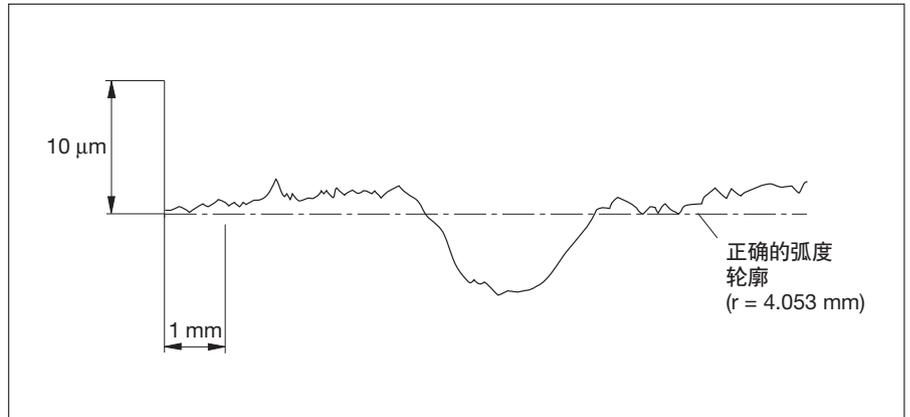


FAG的其它检测方法

几何测量

4 FAG的其它检测方法

经验表明在大多数轴承失效的案例中，可以通过失效现象和工况的数据来找到失效原因。在许多失效原因仍然不明的案例中，可以通过立体显微镜帮助确认。只有少量的轴承失效原因要求对失效现象进行周密检查和对应用工况作深刻分析。FAG的研发能力包括最广泛和最先进的对一些特殊性能的检测手段。推荐事先比较检测方法的经济性，因为后者成本较高。下面部分举例给出了主要的检测领域。



100 : 有磨损沟道的深沟球轴承滚道的轮廓 (通过测量设备来检测滚道曲线)

101 : 轮廓仪

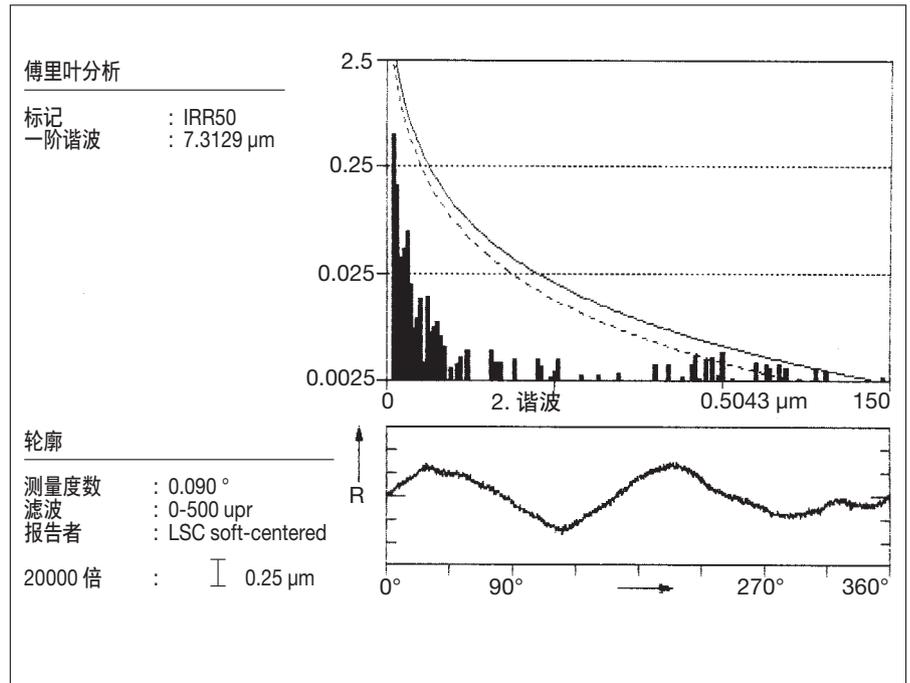


4.1 轴承和轴承零件的几何测量

FAG始终致力于提高滚动轴承的加工质量。因此不论在现场还是在实验室，我们都有最精密的各种测量设备来进行尺寸和形状的检查：

- 长度和直径的测量精确到微米
- 放大倍数达到100,000倍的仪器来检测形状和半径轮廓，见图69，100和101

- 用放大倍数达到100,000倍的仪器来检查圆度偏差，包括波纹频率分析，见图102和103



102 : 6207内圈波纹度频率分析的形状图

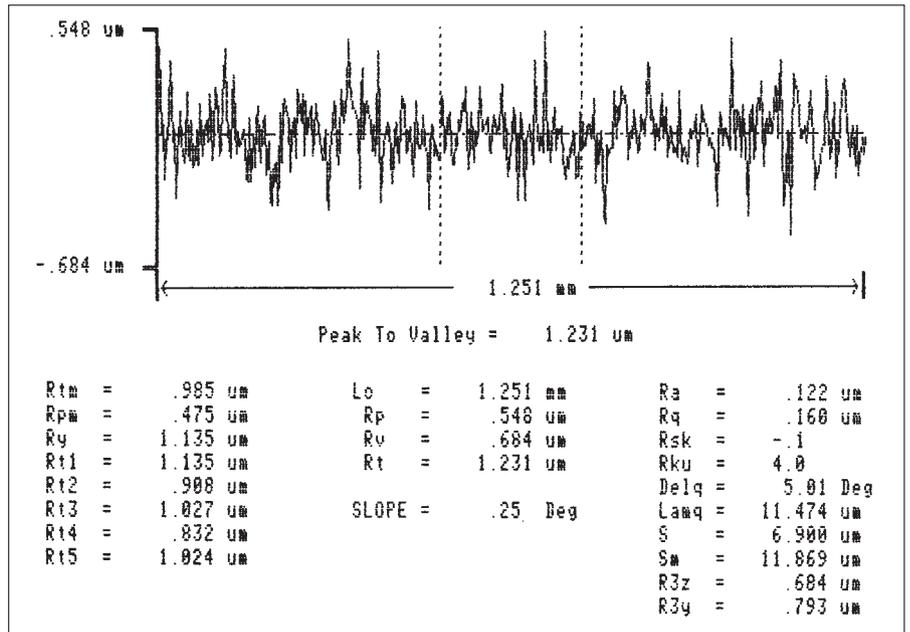


103 : 形状测量系统

FAG的其它检测方法

几何测量

- 精确到百分之一微米的粗糙度测量，见图104
- 在形状测量系统（FMS）和坐标测量设备上检查形状和位置公差，也可以检查类似于铸钢轴承座的不规则结构的部件，见图105
- 检查轴承游隙和单个部件的径向跳动



104：有技术参数的粗糙度测量图表



105：三坐标测量仪

4.2 润滑剂分析和润滑剂检测

FAG有实验室和测试台来检测润滑剂的质量以及对滚动轴承的适用性。在实验室对失效轴承中采集的润滑剂进行分析，经常能为失效原因提供决定性的信息。主要的检测内容有：

- 润滑剂中污染物的数量和类型
 - 固体的，图106a
 - 液体的(含水量)
- 抗氧化剂的使用
- 老化，图106b
- 粘度变化
- 添加剂含量 (减少/降低)
- 润滑脂里的油-皂关系
- 确定润滑剂的类型和级别，比如在再润滑过程中润滑剂兼容性的证据，图106b

要通过润滑剂检测来获得可靠信息，必须提取合适的润滑剂样品(见章节2.2)。从润滑剂的分析结果总能找到初始的污染物。防止磨损的直接方法可以通过检测运行了一定时间的润滑油或脂的总体状态来确定是否再润滑。

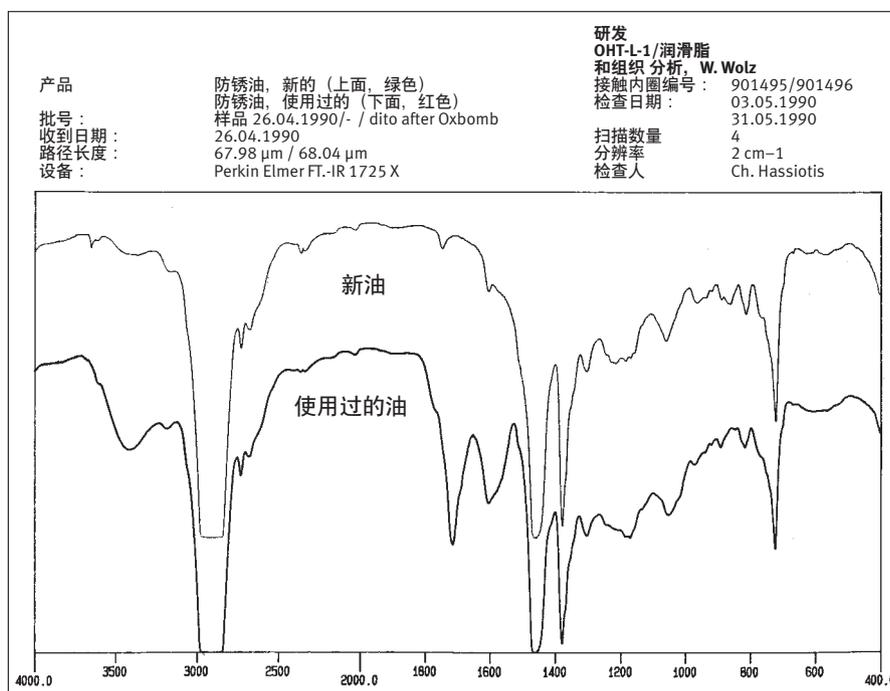
106 a : 检测污染物， ICP-AES分析

元素	波长	因数	偏移	低 最小	低 最大	高 最小	高 最大
钴	228,616	1,673	268	962	415	179515	107157
锰	257,610	1,318	-76	-121	-34	67816	51496
铬	267,716	1,476	381	669	195	76696	51688
铜	324,754	0,834	-471	80	660	2297	3316
钼	281,615	1,073	-17	89	99	47781	44543
镍	231,604	1,778	4	114	62	38487	21640
钒	311,071	0,937	-37	5	45	64228	68560
钨	400,875	0,742	-16	4	26	14129	19053
硅	251,611	2,173	310	509	92	2385	955

样品：污染润滑剂中的固体 方法：钢 1 M(3)

	钴	锰	铬	铜	钼	镍	钒	钨	硅
x	.0107	0.636	1.412	0.185	0.797	0.271	.327	.002	0.359 %
s	.0004	.0002	.011	.0002	.0032	.0063	.0007	.0099	.0006
sr	4.11	0.67	0.03	1.18	0.40	2.31	0.22	57.44	0.06

106 b : 润滑剂红外光谱分析



FAG的其它检测方法

润滑剂分析和润滑剂检测

在一些特殊应用案例中新的润滑剂使用之前，没有测定它们对滚动轴承润滑的适用性。FAG已经开发了测试台来检测这些润滑脂和油的特性。它们已经标准化而且被润滑工业采用以检测新产品，见图107。

107：测定润滑剂质量的测试台



4.3 材料检测

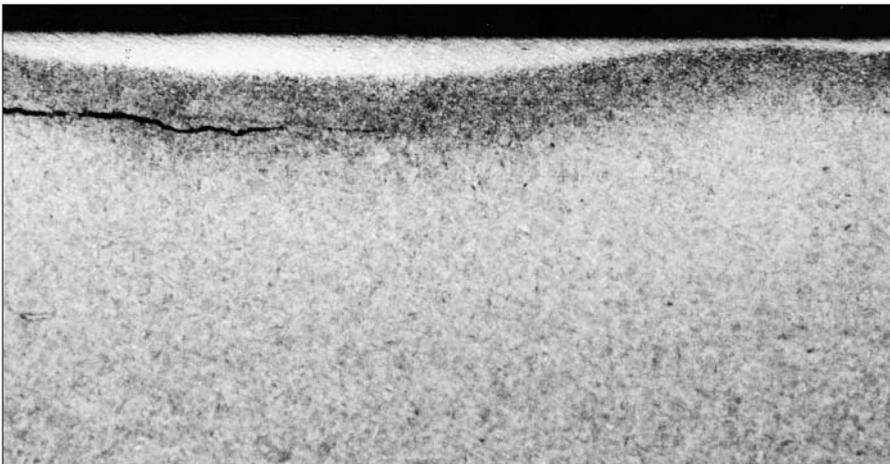
一个完好轴承的所有部件的材料状况很重要。事实上，轴承损坏很少由于材料或生产缺陷造成，如图11，但是如有疑问，材料检测可以提供很重要的信息。在许多案例中，材料状况的变化是由于不可预知的轴承应用工况造成的。

在这部分的主要检测有：

- 检查硬度，很少检查拉伸强度或切口冲击弯曲强度
- 金相结构分析
- 通过对接触面的酸洗可见烧伤区域
- 通过超声波或涡流检测裂纹
- 射线检测残余奥氏体
- 检测材料洁净度
- 材料分析

除了能测定材料缺陷外，也可以判断是否打滑（滑动高温区，如图108）或工作温度过高（在运转时组织变化导致尺寸改变）等。

108：热影响区剖面图



FAG的其它检测方法

X射线微观结构分析

4.4 X射线微观结构分析

放射性检测晶格（在章节4.3检测残余奥氏体）也能得出“凝结”在材料中的残余应力和造成它的应力情况的重要结论。用它可以很近似地判定轴承工作的实际载荷。这对实际载荷状况不能通过计算获得的轴承失效特别重要。然而，特定的滚道应力必需达到大约 $2,500 \text{ N/mm}^2$ 并持续很长时间，因为只有在这个载荷上，才能发生晶格塑性变形而且能用X光衍射测试和定量化，见图109。

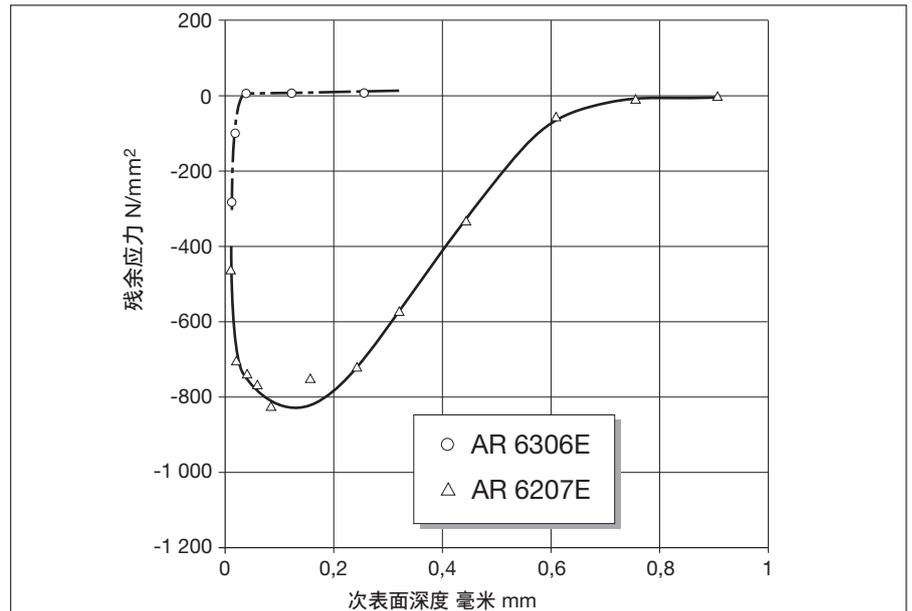
可以参考书籍“机械故障”，Expert Verlag 1990，比如在“采用伦琴（X射线）精细结构分析法的损害研究”有一个详细的有关确定残余应力和计算应力的报告。下面作一个简单的总结。

小面积的残余应力（表面积几平方毫米，深度 $\frac{1}{100}$ 毫米）能通过X光测量晶格膨胀量计算出。通过电化学的表面放电方法来对轴承套圈滚道下不同深度分层测量。可获得象图110的模式。从整个变形深度和应力最大的地方，一方面可以推断出最大外部载荷，另一方面是在滚道上的可能滑动应力的分布。这对研究失效原因很重要，特别是当测量出来的值与计算出来的期望值偏差很大时。

109：X射线微观结构分析设备



110：从 X 光微观结构分析获得的残余应力模式；在6207E外圈上有大的切向力，在参考轴承6303E中应力无增加。



4.5 扫描电子显微镜检查 (SEM)

当检查失效时，除了目测外还用立体显微镜来检查每个失效原因。然而和失效有关的细节有时候很少。由于可见光的波长相对较长，限制了可见光发射的图像。通常破坏的滚动轴承滚道表面不光滑，照片只

能被放大到50倍。在用可见光检测表面有困难时可以用以非常短的电子光束工作的扫描电镜 (SEM) 检测。它能将检测到的细节放大几千倍，如图111。

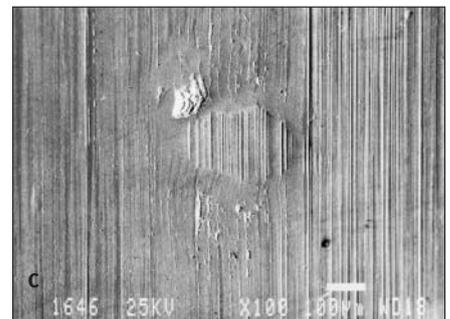
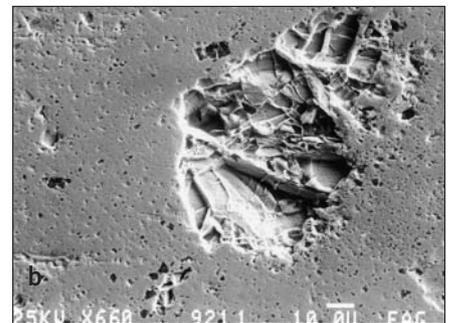
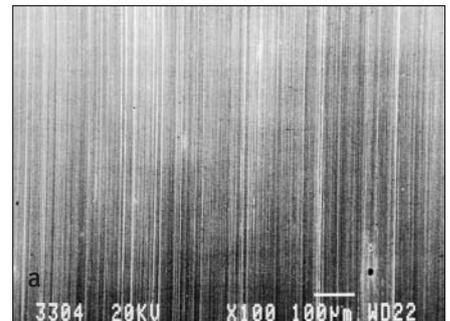
因此对磨损、电流通过、断裂区域、外界微粒凹坑和材料夹杂物等造成的滚道破坏，电子扫描显微镜是进行滚道外观检查的一种重要手段，见图112a, b和c。

111 : 扫描电子显微镜



112 : 电子扫描显微镜拍摄的不同表面结构。

- a : 滚道是好的
- b : 硬的外界微粒造成的凹坑
- c : 开始疲劳破坏

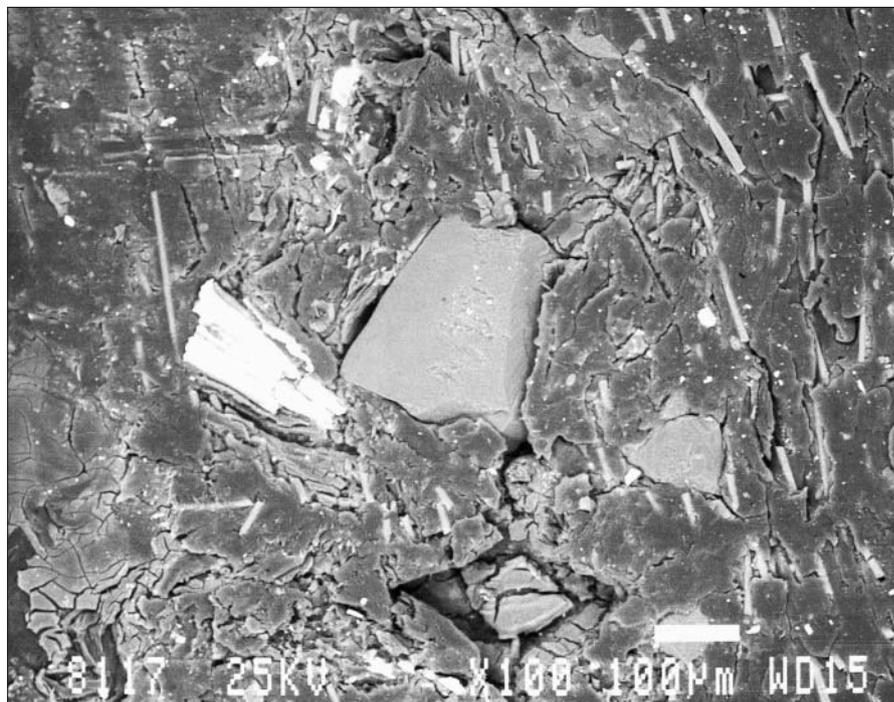


FAG的其它检测方法

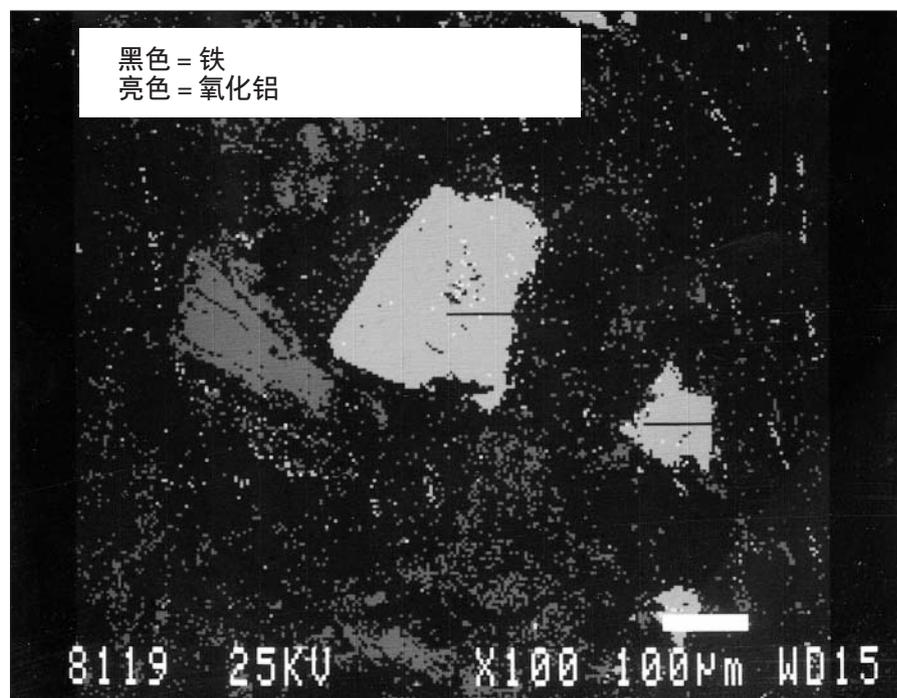
扫描电子显微镜的检查

用分光计和电子扫描显微镜一起可以进行所谓的电子光束微观分析。它可以在大约 $1\mu\text{m}^3$ 的范围内进行材料成分检测。这有助于检测仍嵌在轴承保持架兜孔中的原始外部微粒，见图113a和b。它还可以检查涂层、接触面反应层以及微观区域的材料成分。

113：外界微粒的微观分析
a：保持架横梁上的外界微粒



113 b：外界微粒的材料成分



4.6 零件测试

在FAG的研发部门有各种各样的测试台来检测新设计产品的有效性。在某些情况下，这些测试可用来查明轴承失效的原因。它们包括：一些可以在客户处直接测试，比如在设备上的变形和振动测试，其它如密封度测试、摩擦力矩测量和寿命测试等可以在试验台上进行，见图114和115。这些测试在已设定的状况下能可靠地预测结果。一旦轴承满足了实验要求，对提出的失效案例的检测就必需放在对实际工况的检查（预期不到的额外载荷，以及错误安装造成的等等）。轴承在未预见到的短期运行后失效，测试台的技术检测设备应该能在失效的初始阶段监测到。这在监测中通常很困难，但是它经常是查明失效原因的重要手段。

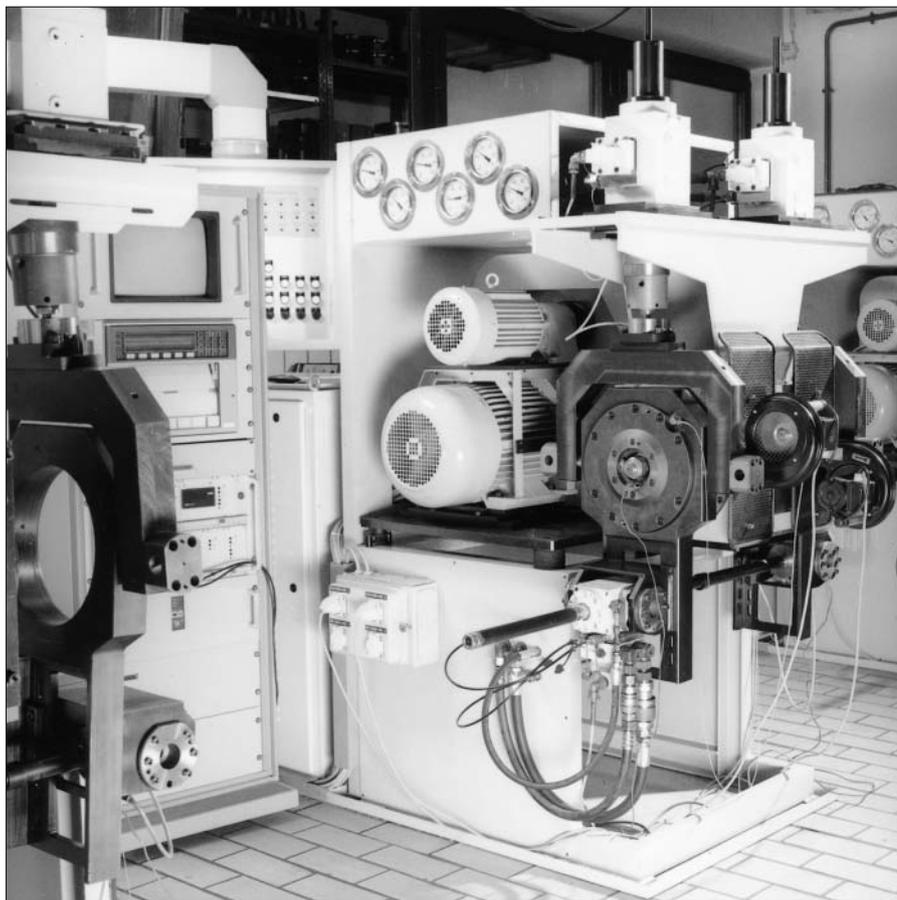
114：检测滚动轴承密封性能的测试台



FAG的其它检测方法

零件测试

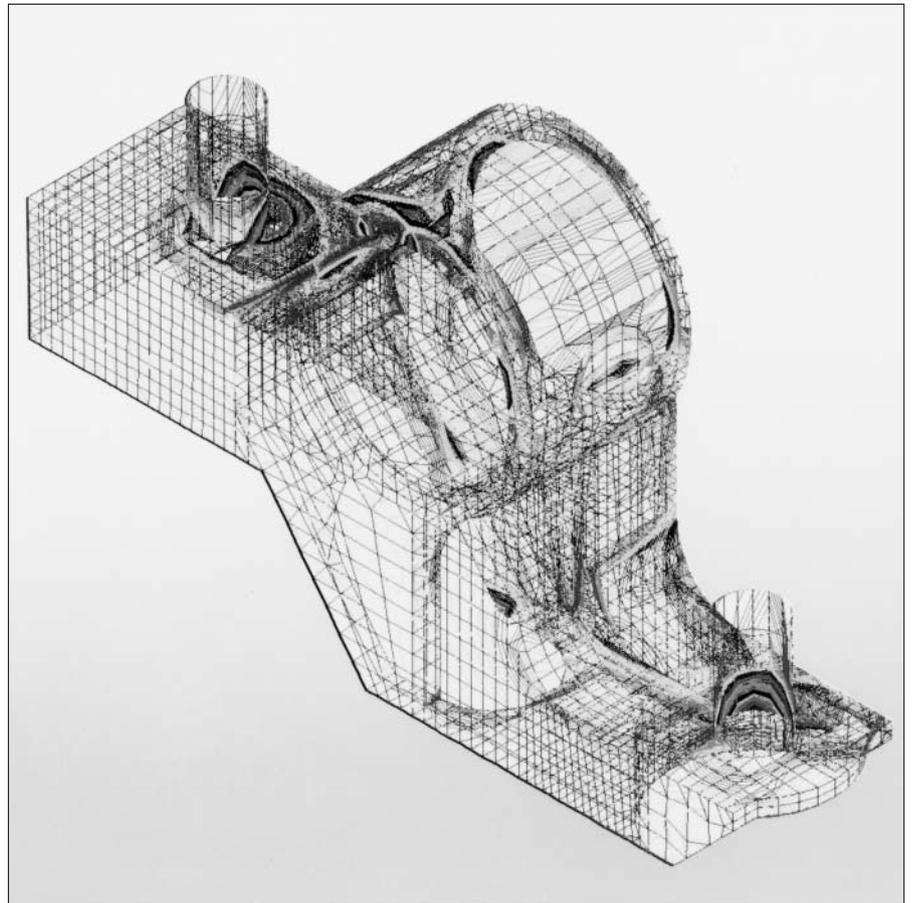
115 : 汽车轮毂轴承的模拟测试台



4.7 计算载荷状况

在几个轴承例子中，它们的载荷状况未完全清楚，可以根据以往经验为新的结构选择载荷情况。在轴承运转后期出现破坏时，精确的工况载荷计算经常能帮助找到原因。对期望寿命和实际寿命进行比较以及具体的润滑状况都特别重要。FAG有应用很广泛的计算程序。即使是最复杂的轴承也适用。这些程序可以计算轴承外部载荷、安装套圈间的倾斜、内部应力、轴承的运动学、配合件的变形、温度变化等。这些程序的复杂性包括用分析公式的简单评估到对非线性问题用各种数量迭代的近似结论，甚至是用最复杂的有限元方法对配合件的三维应力计算，见图116。

116：用有限元（FEM）对轴箱轴承座体的应力计算



备注

舍弗勒贸易 (上海) 有限公司
上海市嘉定区安亭镇安拓路1号
邮编：201804
电话：+86 21 3957 6500
传真：+86 21 3957 6600
网址：www.schaeffler.cn

北京分公司
北京市朝阳区东三环北路甲19号
嘉盛中心28层2801室
邮编：100020
电话：+86 10 6515 0288
传真：+86 10 6512 3433

上海办事处
上海市嘉定区安亭镇安拓路1号
(安虹路西侧)
邮编：201804
电话：+86 21 3957 6513
传真：+86 21 3959 3205

沈阳办事处
沈阳市沈河区青年大街219号
华新国际大厦14层H/I单元
邮编：110016
电话：+86 24 2396 2633
传真：+86 24 2396 2533

广州办事处
广州市体育东路138号
金利来数码网络大厦1601-1602室
邮编：510620
电话：+86 20 3878 1001/1416/0904
传真：+86 20 3878 1667

南京办事处
南京国际金融中心33楼G,H座
邮编：210029
电话：+86 25 8312 3070/71/73
传真：+86 25 8312 3072

济南办事处
济南市泺源大街150号
中信广场430室
邮编：250011
电话：+86 531 8518 0435/36/37/39
传真：+86 531 8518 0438

成都办事处
成都市提督街88号
四川建行大厦2815室
邮编：610016
电话：+86 28 8676 6718/38/58
传真：+86 28 8676 6728

武汉办事处
武汉市江汉区建设大道568号
新世纪国贸大厦3015室
邮编：430022
电话：+86 27 8526 7335/36/37
传真：+86 27 8526 7339

太原办事处
太原市府西街69号
山西国贸中心西塔楼12层1209号
邮编：030002
电话：+86 351 8689 260/62/63
传真：+86 351 8689 261

重庆办事处
重庆市建新北路1支路6号
未来国际大厦9-2
邮编：400020
电话：+86 23 6775 5514/74
传真：+86 23 6775 5524

西安办事处
西安市高新区科技路33号
高新国际商务中心1202室
邮编：710075
电话：+86 29 8833 7696/97/98/99
传真：+86 29 8833 7707

天津办事处
天津市和平区南京路189号
津汇广场一座1110室
邮编：300051
电话：+86 22 8319 2388
传真：+86 22 8319 2386

大连办事处
大连市西岗区中山路147号
森茂大厦0408室
邮编：116011
电话：+86 411 8368 1011
传真：+86 411 8368 1012

杭州办事处
杭州市西湖区杭大路15号
嘉华国际商务中心1507室
邮编：310007
电话：+86 571 8717 4820/21/22/30
传真：+86 571 8717 4833

长沙办事处
长沙市芙蓉中路一段478号
运达国际广场1602室
邮编：410001
电话：+86 731 8513 9138
传真：+86 731 8546 7042

哈尔滨办事处
哈尔滨市南岗区红军街15号
奥威斯大厦21层G座
邮编：150001
电话：+86 451 5300 9368
传真：+86 451 5300 9370

郑州办事处
郑州市金水路226号
楷林国际20楼2007室
邮编：450008
电话：+86 371 8611 0766
传真：+86 371 8611 0799

所有数据系经仔细考虑而准备，其精确性已经得到审核。但本公司并不为任何不正确或不完整的数据承担责任。我们保留进行技术方面修改的权利。

© Schaeffler Technologies GmbH & Co. KG

版本: 2011年6月

版权所有，未经许可不得翻印或局部翻印。

WL 82 102/2 CN-CN