

微动磨蚀概论

1. 微动磨蚀的典型受害者

1.1. 车、船、航空器上的轴承与电气接点

相对而言，使用中的汽车很少处于震动的怠速状态，也不可能以微小幅度往复剧烈运动。然而汽车业可能是最早发现微动磨蚀问题的产业。其原因在于，汽车几乎都是成车出货，对个别轴承而言刚性不足，汽车的载具（火车、卡车、船）又都是长时间持续震动的平台，而运送时间少则数日、多则数月，再加上汽车上轴承数量众多的特性，使得汽车业很容易受害于微动磨蚀，也很容易发现这个问题的严重性。

1.2. 马达、发电机、泵轴承

马达、发电机与液、气泵浦，即使是出货后经长途运输，但因相对而言刚性较高，容易固定，因此较不受 False Brinelling 问题困扰。然而在安装上机械设备、开始运转后，由于马达/发电机本身的回转与胀缩，以及被驱动设备（如减速机）的震动等因素，导致轴承外环与轴承座之间、轴承内环与轴心之间易发生 Fretting Corrosion。

更常见的，则是安装作为备援机的马达、发电机与泵。因为主轴的固定装置已移除，备援机的轴承将因整个设施无处不在的震动源而微幅震动，导致 False Brinelling。案例显示，在一个大型化工厂中，随机选择 10 台备用泵与马达起动，其中 7 台在一日之内轴承咬死，2 部在一周内咬死，最后一部也仅能使用 3 周，全部 10 台马达、泵的轴承经拆解检查，均有严重 False Brinelling 症状。

1.3. 齿轮箱

案例显示，成组的齿轮若未经妥善的防微动磨蚀处理即进行长途运输，其表面亦会发生明显的微动磨蚀。这说明了齿轮若出货时未浸于齿轮油中，就应该涂抹含反应性固体润滑剂的润滑脂以防磨蚀。

1.4. 螺栓

案例显示，机器设备上的螺栓头底部在长期震动影响下，也会发展出 Fretting Corrosion，导致螺丝卡死 (Seizer)，例如扇叶、涡轮叶片的固定栓与鸠尾榫 (Dovetail)。

2. 抗微动磨蚀的润滑效能测试

出于显而易见的原因，对 False Brinelling 的研究与重视较 Fretting Corrosion 为多，针对 False Brinelling 现象的测试标准很多，而完全可以理解的是，这些标准的制定都是由滚动轴承厂商所主导的。

除了 HRE-IME-Riffletest 之外，另两种微动磨蚀测试都是以小角度摆动轴承来模拟轴承的微动，而 HRE-IME-Riffletest 则是以往复施压以及盐水流注来模拟滚珠对轨道的周期性冲击，主要适合于模拟回转盘的工作条件。

2.1. SNR-FEB 2

SNR-FEB 2 标准即法国 SNR 公司 (注2) 用来评测润滑脂的抗微动磨蚀效能之用。根据 SNR-FEB 2 的测试方法与学理，德国克鲁勃润滑剂公司设定测试方式如下：

1. 轴承型式：D=52~55.5mm、d=30~35.2mm、H=16的滚珠或滚柱止推轴承，如 51206或81206
2. 轴向力：8000N，换算压力 2100N/mm²
3. 测试时间：5或50小时
4. 摆动频率：24Hz
5. 摆动角度：3°
6. 环境温度：-20或25°C

测试结果：

7. 轴承磨耗质量，mg
8. 压痕深度，μm (罕用)



SNR-FEB 2 测试后的止推轴承，可以看到dent内的金属表面有magnetit层造成的虹彩光泽

2.2. ASTM D 4170

这个标准又称为 Fafnir 测试，因为这个测试标准采用的就是美国 Fafnir 公司 (注 3)发明的 Friction Oxidation Tester 测试设备，又名 Falex Fretting Wear Tester。

测试方式：

1. 轴承形式：两个滚珠止推轴承，D=35.69mm、d=16mm、H=15.75mm，轴承内有 9颗D=7.142mm的滚珠，滚珠与轨道必须研磨，使用钢质保持器
2. 轴向力：2450N
3. 测试时间：22小时
4. 摆动频率：30Hz
5. 摆动角度：12°
6. 环境温度：室温

测试结果：

7. 轨道磨耗质量，mg

2.3. HRE-IME-Riffeltest (注4)

回转盘轴承 (Slewing Bearing)的世界领导厂，德国的 Rothe Erde以此标准验证润滑脂的抗微动磨蚀效能，大型风力发电机上的扇叶轴承(pitch)与方位轴承(yaw, azimuth)必须采用通过下述测试的润滑脂。

测试方式：

1. 轴承型式：QJ212.TVP
2. 轴向力：10Hz正弦波，波峰 70kN，换算最大压力 ~3000N/mm²
3. 测试时间：100万个轴向力周期
4. 环境介质：测试时以 5.7~6 ml/min的流量流注 1%盐水

通过条件：

5. 最大波纹 (即False Brinelling痕迹)深度<10μm
6. 平均波纹深度 <3μm
7. 锈蚀度 2(无锈迹 =1；有变色 =1.5；波纹处有些微锈迹 =2；波纹内与其周围有锈蚀 =3；波纹内与其周围有严重锈蚀 =4；出现大面积锈蚀 =5)

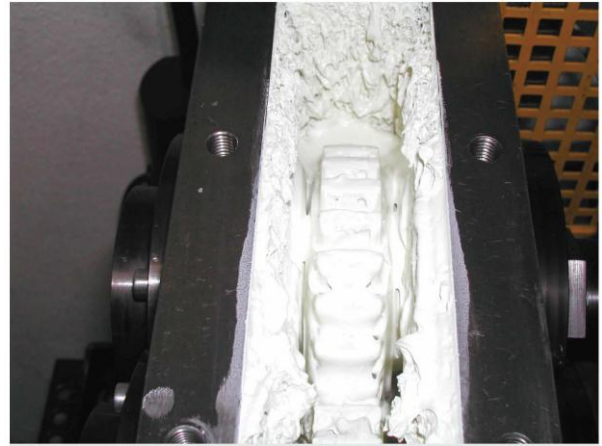
3. 微动磨蚀的润滑解决方法

在润滑剂行业中，对于抗微动磨蚀的添加剂并没有明确、约定俗成的名称定义，有些专家与厂商将其成果称之为 anti-fretting 添加剂，然而不论叫什么名字，使用者仍应谨慎与润滑剂供货商确定该产品是否适用于滚动轴承内。

尽管一般认为 Fretting Corrosion 与 False Brinelling 是一样的成因与解决方法，但实际上仍有明显的不同。主要的差异在于，Fretting 一般发生于「理想状况下完全刚性、无磨擦的机构件接合面」，而 False Brinelling 则发生于滚动轴承类机械元件。这就注定了两者的解决方式完全不同。

Fretting Corrosion 大多发生于非动作机构，其摩擦成因是刚性不足。例如轴承外环与轴承座之间原本在安装后，在完美世界里不会有相互摩擦，但在真实机械系统之中，微动摩擦却很难避免。因此最好在安装轴承时，于内外环上都涂抹一点抗微动专用润滑膏，仅可以帮助轴承安装得更顺畅、精确，也可以预防 Fretting Corrosion。Fretting Corrosion 也可能发生于低速机件，如前述大型风力发电机的扇叶角度调整齿条、花键，或齿式连轴器内。这些机件使用的润滑脂也应该采用含抗微动专用的固体润滑剂。

无论是非动作机构或低速机件，在润滑油脂中添加固体润滑剂不失为一种简单有效的解决办法，一般在需要抗 Fretting Corrosion 的场合使用传统型固体润滑剂如 MoS₂、石墨效果不佳，而采用反应性固体润滑剂（注5），例如德国克鲁勃润滑剂公司称为 ALTEMP、以磷酸锌衍生物为主的特殊固体润滑剂，即针对微动机件而开发。



保护低速齿轮等机件免于 Fretting Corrosion，含特殊磷酸锌的润滑脂。

而对于需要持续、甚至于高速运转的轴承而言，不可能采用 anti-fretting 的固体润滑剂，必须以化学反应性添加剂来克服怠速时微震动导致的 False Brinelling 问题。德国克鲁勃润滑剂公司的 MICROLUBE，即为 Anti-Brinelling 专用的添加剂配方组合。

抗 False Brinelling 的化学添加剂，其基本原理与传统抗磨防蚀添加剂一样，均是金属表面化合形成一个抗磨耗的保护膜，但各研发团队的侧重点不尽相同，因此抗 False Brinelling 的添加剂种类，以及其作用机制较为多样化。甚至于在不是非常严苛的情况下，良好配方的 anti-wear 添加剂也能发挥 anti-fretting / anti-brinelling 的效果。

此外，以润滑脂的机件内，润滑脂也应具备较高的施油率与较低的动态黏度，以便对微动摩擦点提供较及时的油脂补充。

4. 小角度摆动轴承

采用滑动轴承 (平轴承) 技术的小角度摆动轴承 (Swivel Bearing) 与枢轴承 (Privot Bearing), 一般来讲其摩擦行程大于 Fretting Corrosion 的形成条件, 但又不易达到液态摩擦域 (Fluid Friction Regime), 因此也会发生近似 Fretting 的问题。近年来业界逐渐

流行采用 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与其他成分搭配, 制成特殊的反应性固体润滑剂(注5), 专供此类近似微动摩擦的小角度往复摆动机件。

一般“白色固体润滑剂”通常指氢氧化钙, 它针对钢铁有催化作用, 可促使钢铁表面行成磁铁, 以避免行成赤铁。

注2: SNR于1880年创设于瑞士 (当时公司名称是 SRO), 1946年SRO被雷诺汽车并购后改名 SNR, 该公司一向专注于开发汽车、火车以及航空用轴承, 可以想见 SNR对微动磨蚀会有较先进的研究。SNR现为日本 NTN旗下成员。

注3: Fafnir Bearing Company 于1911年设立于美国康乃迪克州, 1985年被缅因州 Torrington Company (隶属于美国 Ingersoll-Rand集团) 所并购, 2003年又被美国 Timken Company所并购。至今 Timken产品线中仍有以 Fafnir 为名的轴承系列。

注4: HRE = Hoesch Rothe Erde, 德国回转盘轴承专业制造厂

IME = Institut für Maschinenelemente und gestalt der RWTH Aachen, 德国亚琛工业大学机械元件与设计学院
Riffletest = Ripple Test = 波纹测试

注5: 传统固体润滑剂 - 石墨、二硫化钼、氮化硼、铁氟龙等。前三者是以低阻力的晶格位移降低摩擦力, 并以本身的厚度与抗压性阻止两金属面的黏着 (adhesive) 性损伤; 铁氟龙无晶格位移特性, 是以其体积与弹性达到抗摩、抗熔执黏着的目的。反应性固体润滑剂 - 氢氧化钙、磷化锌、MoDTC (二硫基二硫代甲酸钼, 俗称有机钼) 与硫化铁等, 其作用是金属表面产生物理或化学作用, 改变其性质。反应性固体润滑剂与 anti-wear 添加剂有时十分难以区分, 很多文献与厂商也直接把反应性固体润滑剂称为 anti-wear 添加剂或减摩剂 (Friction Modifier)。事实上有两种润滑添加剂常被归类为减摩剂: 轻摩擦时有效的油性添加剂 (Oiliness Additive), 以及重负荷往复摩擦时有效的反应性固体润滑剂。