

第12章 机械设备润滑状态的监测与诊断技术

胡大榭 熊中衍



目前，可用于监控设备及其部件润滑状态的有下列方法：

1) 工作运转变量的监控，如监控机器运转时的载荷或接触压力、速度及温度等。

2) 机械设备润滑系统工作状况的监控，如润滑油剂供送情况（压力、流量等）、润滑油剂的有效性（粘度、成分、组成等）。

3) 监控由摩擦引起的能耗，如摩擦力、摩擦力矩及功率损耗以及由摩擦引起的噪声、温升、振动。

4) 监控由摩擦引起的材料损耗，如磨屑与润滑油剂污染物等。这是设备润滑系统润滑状态监测的主要方法，如磁塞检验法、光谱分析程序(SOAP)、铁谱法 (Ferrography)、颗粒计数法、放射性示踪原子检验法以及斑点检验法 (Patch Testing) 等，这是本章的重点，特别是其中的铁谱法。

第1节 设备润滑状态监测的主要方法

在各种机器中，摩擦副之间的相对运动与接触

将不断产生大量的磨屑和微粒即磨损颗粒。这些磨损颗粒从摩擦副表面脱落以后，一般都进入润滑或液压介质中，对这些磨损颗粒进行鉴定和测量可以分析其表面形态、质量变化并确定其磨损率是否属于正常范围内。早期是在设备润滑系统中装设磁塞来收集润滑油中的磨屑，1964年开始有了分析润滑油中磨损金属的光谱仪，1972年开始生产铁谱仪，以后，放射性示踪原子法和各种微观分析仪器又相继出现并得到应用。上述几种方法，也就是目前较为广泛采用的监测方法。

(一) 磁塞监测技术

在润滑系统中装设磁塞或探针，便能将润滑油中的磨损颗粒吸引到磁塞上。定期取出磁塞，换上一根新磁塞，将取出的磁塞上的磨屑大小和数量进行分析就可以有效地分析磨损情况，对比不同时间内所保存的磁塞上磨损颗粒情况，就有助于分析磨损发展趋势。用磁屑检测器与磁强计也可以估量所收集到的磨屑量及磨屑产生趋势。同时，在显微镜下比较磨屑识别图或照相，还可以估计哪一个部件的磨损量有所增加。还可以同时和污染物颗粒计数

表12-1-1 磁塞收集的磨屑的特性

序号	磨屑来源	特征
1	滚珠轴承	<p>1. 一般碎片</p> <p>(1) 圆形的、“玫瑰花瓣”式的，径向分开的形式</p> <p>(2) 高度光亮的表面组织，带有暗淡的十字线和斑点痕迹</p> <p>(3) 细粒状、浅灰色、闪烁发光</p> <p>2. 钢球的碎片</p> <p>(1) 开始时（特别是轻负荷的球轴承上）鳞片状，边缘大致为圆的</p> <p>(2) 放大10~20倍，表面有很小的斑点痕迹，这是由于突出部分被研磨后会有闪光作用。鳞片往往是中心较厚的“饼形”状。通常一面是高度磨光的表面，另一面是均匀的灰色粒状组织</p> <p>(3) 在重负荷下，初始产生的微粒呈较暗的黑色，但移向光源时会闪烁发光</p> <p>(4) 其后产生的下层材料是较黑色的、形状更不规则，并具有较粗糙的结构</p> <p>3. 滚道的碎片</p> <p>表面破碎的碎片，通常一面很光亮，并像钢球的材料一样，带有暗淡的十字划痕，同时与滚柱轴承的滚道材料有相似的特性，形状大致是圆的</p>

序号	磨屑来源	特征
2	滚柱轴承	<p>1. 滚柱的碎片</p> <p>(1) 通常为长度等于 2~3 倍宽度的卷曲矩形状</p> <p>(2) 高度光亮的表面</p> <p>(3) 细粒状、浅灰色、闪烁发光</p> <p>(4) 由于滚动作用, 在微粒的一面整个宽度上形成了一系列的平行线痕迹</p> <p>(5) F 层材料是长的, 并呈撕裂状, 其颜色比表面碎片较黑</p> <p>2. 滚道碎片</p> <p>(1) 不规则的长方形</p> <p>(2) 高度光亮的表面组织, 沿运行纵向带有划痕</p> <p>(3) 细粒状、浅灰色、闪烁发光</p> <p>(4) 由于表面是平的滚动接触, 因而划痕是沿滚道方向</p> <p>(5) 滚道和滚柱两者的外侧往往首先破碎, 一般是先出现矩形鳞片, 而后逐渐恶化, 变成很不规则的块状</p> <p>(6) 内滚道首先恶化, 继而是滚柱, 最后是外滚道</p>
3	滚珠和滚柱轴承	<p>1. 旋转和打滑碎片</p> <p>(1) 形状通常是粒状的</p> <p>(2) 碎片是黑色尘粒</p> <p>2. 保持架的碎片</p> <p>(1) 是大而薄的花瓣形鳞片</p> <p>(2) 有光亮的表面组织</p> <p>(3) 呈铜色</p> <p>(4) 开始时的碎片是细的青铜末, 继而是大的铜色花瓣形鳞片。这种鳞片并非出现严重故障, 但当其中出现分散的铜微粒, 或铜微粒嵌在鳞片, 或有较厚的块状青铜微粒时, 则意味着有严重的故障</p>
4	滚针轴承	<p>(1) 尖锐的针形, 与刺类似</p> <p>(2) 粗的表面组织</p> <p>(3) 深灰色闪烁发光</p>
5	巴氏合金轴承	<p>(1) 平的或球形的一般形状</p> <p>(2) 平滑的表面组织</p> <p>(3) 类似焊锡飞溅物或银的外表</p> <p>(4) 在正常磨损情况下, 即使局部热熔化和部分材料已扩散到轴承表面的微小空腔, 回油中也很少有碎片</p> <p>(5) 当轴承开始发生故障时, 表面出现任意方向的发丝粗细的裂纹, 在轴承表而局部油压作用下, 油进入裂纹中造成微粒松动、受热脱落。脱落的碎片常常沉积在轴承的另一面或进入回油路中, 其形状常常类似焊锡的细小球体</p>
6	铅/20%锡轴承	<p>(1) 不规则的形状</p> <p>(2) 平滑的表面组织, 并有细的平行线纹</p> <p>(3) 外表像焊锡状, 银色带有黑线纹</p> <p>(4) 这些轴承有良好的耐疲劳性, 一般在磨屑从表面脱落和进入油液之前, 先有一定的故障进展状态</p>

(续)

序号	磨屑来源	特征
7	齿轮	1.正常的磨损碎片 (1) 不规则断面的发丝粗细的纹织物, 很短并混有金属粉末 (2) 表面组织粗糙 (3) 呈深灰色 (4) 小的细发丝状纹织物通常成团, 在磁塞上呈现较厚实状态 2.故障碎片 (1) 形状不规则 (2) 表面带擦痕 (3) 外表粗糙, 暗灰色带亮点 (4) 鳞片有时呈现齿轮牙齿的外形。一般外侧磨得更光亮, 并有明显划痕, 有时伴有热变色。材料没有光泽, 而且比由轴承产生的碎片较粗糙一些 (5) 由于齿轮的滚-滑接触特性, 碎片表面的平行划痕与滚了轴承的碎片类似 (6) 下层的碎片是很不规则的, 长而断裂。这一状况由于齿轮的进一步研磨作用而加重

法相结合分析比较磨损情况。

磁塞检验是一种常用分析方法, 有的类型的磁塞带有指示器, 可以进行在线测量, 进行跟踪记录, 使用费用较低, 简单易行, 适合于检测 100~400 μm 的颗粒。表12-1-1列出磁塞收集的磨屑特征, 从而可以根据这些磨屑的数量大小和形态来推测设备不同部位的磨损状态。但磁塞监测法存在下列缺点:

1) 磁塞所收集到的磨屑量与润滑油中所携带的磨屑量之间的数量关系很难确定, 因而几乎无法用定量表示。

2) 磁塞收集到的磨屑重差积累, 不便于观察及分析。

3) 磁塞收集的主要是数百微米以上的大磨屑, 而出现数百微米以上的磨屑时, 零件的磨损已相当严重了, 因此, 磁塞的早期预报性较差。

图12-1-1是用三元坐标表示的机械润滑系统磨损工况与磨损颗粒的浓度、颗粒尺寸三者之间的关系

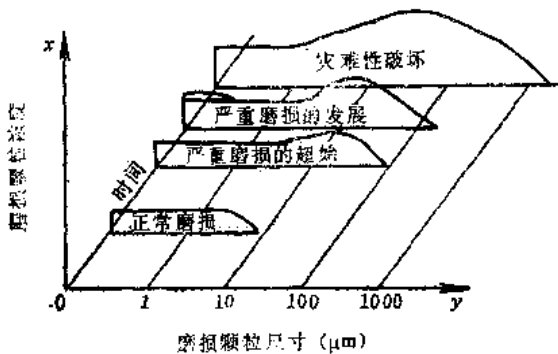


图12-1-1 润滑系统磨损的发展过程

系, 说明了润滑系统磨损的发展过程。

磁塞的有效检测范围主要为数百微米以上的颗粒, 因此可以及时检测出较大的造成灾难性破坏的磨损颗粒, 防止突发性故障的发生。

(二) 光谱监测技术

1. 概述

对润滑油料进行光谱分析, 主要是使用原子吸收光谱或原子发射光谱来进行, 目前已有专门的油料分析光谱仪生产。通过分析油中金属磨损颗粒化学元素的含量, 对比不同时期油中金属含量的增加速度, 了解设备摩擦副的磨损情况, 正确规定润滑油的使用期限, 减少停机时间。

1) 根据不同时期各种金属磨损颗粒所含金属元素量(ppm), 可以判断摩擦副磨损程度, 预报可能发生的失效及磨损率。

2) 根据微粒的化学成分及其浓度的变化, 可以判断出现异常现象的部位以及磨损的类型。

光谱监测技术与铁谱监测技术及颗粒计数技术相配合, 还可以发挥出对磨损监测技术的更大作用。

2. 工作原理

关于光谱分析的工作原理和优缺点, 在本卷第6章第3节中已作了介绍, 此处不再重复。用于油品分析的光谱仪可以带一台计算机进行控制。将润滑油样放在小油盘中, 利用两个电极间产生的高压交流电弧, 将机油所含金属(如铜、铁、铅、锌、铝、钠等)和非金属元素(如硼、硅等)激发, 使其放射出特定波长的光波, 再用光栅分光 and 光电倍

增管接收，并将光信号转变成电信号，经放大及模数转换，将元素含量数据显示或打印出来。根据油中各元素的含量变化情况，可以了解运动件的磨损情况、添加剂含量变化情况以及油的污染情况。

光谱油料分析的优点是快速而精确，但不能检测如下失效形式：1) 失效过程太快；2) 磨损颗粒尺寸较大。

图12-1-2为磁塞、光谱两种监测方法的有效检测范围与铁谱监测方法的比较。从图中可以看到，在10~100 μm ，即严重磨损可能发生与发展的特征性颗粒范围内，磁塞与光谱油分析法的效率低于50%，因此有时不能发现已经出现的异常故障。

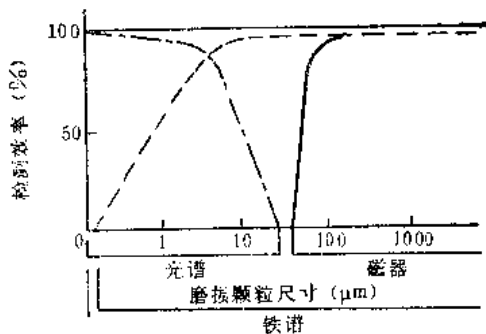


图12-1-2 磁塞、光谱与铁谱的检测效率与磨损颗粒尺寸的关系

由于光谱分析技术所需投资及使用费用较高，主要应用于铁道车辆、飞机、内燃机、冶金及石油化学等重要工业设备润滑状态的监测。

(三) 放射性同位素 (示踪原子) 监测技术

使用热中子或回旋加速器产生带电质子核粒辐照活化零件，然后进行磨损监测。所采用的方法有以下三种：

1) 薄层活化示差法 即以测定局部活化零件在磨损试验过程中放射性能量的改变来评定磨损量和速率。零件活化层深度控制在20~250 μm 间，零件的放射性能量很低，常在10 μci 左右，可用于对发动机中的较大零件的磨损监测。

2) 浓度法 即以测定油中活化磨损颗粒的放射性能量来度量 and 监控零件的磨损情况，放射性能量为20 μci 左右。可测精度 10^{-6}g/L 。

3) 滤油器流通法 即在浓度法的基础上，扩

展一个滤油器的测量室及电测线路，总的磨损量可由测量滤油器与油中的磨损颗粒相加得到，可测精度0.0001 $\mu\text{m/h}$ 。

放射性同位素监测技术目前已比较成熟，准确而可靠，比较安全，只是成本较贵且放射性同位素不易取得，故尚不能普及应用。

关于液压油或润滑油的污染颗粒计数法，在本卷第7章已作了介绍，此处不再重复。而斑点检验法是通过滤纸上油滴斑点，颜色变化来判断污染水平，不作专门介绍，可从有关资料中了解到。

(四) 铁谱监测技术

铁谱仪是Seifert和Westcott在1970年提出的，其主要原理是让润滑油样通过一个高梯度磁场，利用磁场的作用，将油样中的固体粒子包括磨损颗粒沉积在经过特殊处理的基片上，当油样从基片上流过之后，磨损颗粒就沿着基片的长度方向沉积下来。由于这些磨损颗粒是在磁力作用下沉积的，因此可以排除非磁性颗粒并能使磨损颗粒按尺寸大小分开沉积，不致于相互覆盖，可以单独观察各颗粒的特征。

把谱片放在光学显微镜下用反射光进行检查时，由于很难把金属颗粒与化合物区分开来，因此需使用能同时使用反射光与透射光的“双色显微镜”或“铁谱显微镜”。

由于金属中的自由电子对光波的反射作用，光线在金属颗粒表面只能穿透很少几个原子层，而由化合物组成的颗粒（主要是非金属颗粒）则可以透过光线。因此，当在显微镜中同时用红色反射光和绿色透射光进行照明时，金属颗粒吸收透射绿光而把红色光反射入物镜，因此呈红色；化合物则允许较多的绿色透射光通过，因而呈现绿色。如果化合物颗粒厚度为几个微米，则呈现由黄到橙的颜色。金属粒子的表面状况也可以通过反射光的照明来进行观察。

铁谱分析监测技术的内容包括磨损颗粒的分离、大小颗粒数量的测定、数据的综合与处理；磨损趋势的分析、颗粒形态的观察与分析，最后作出判断。这一技术目前基本仍然属于离线监测技术，主要依靠工作人员的手动操作和经验去作出正确的判断。可安装于润滑油管路中的“在线式”铁谱仪，目前使用还不普遍。近年出现的旋转式铁谱仪（又称旋转式微粒沉淀器）能克服分析式铁谱

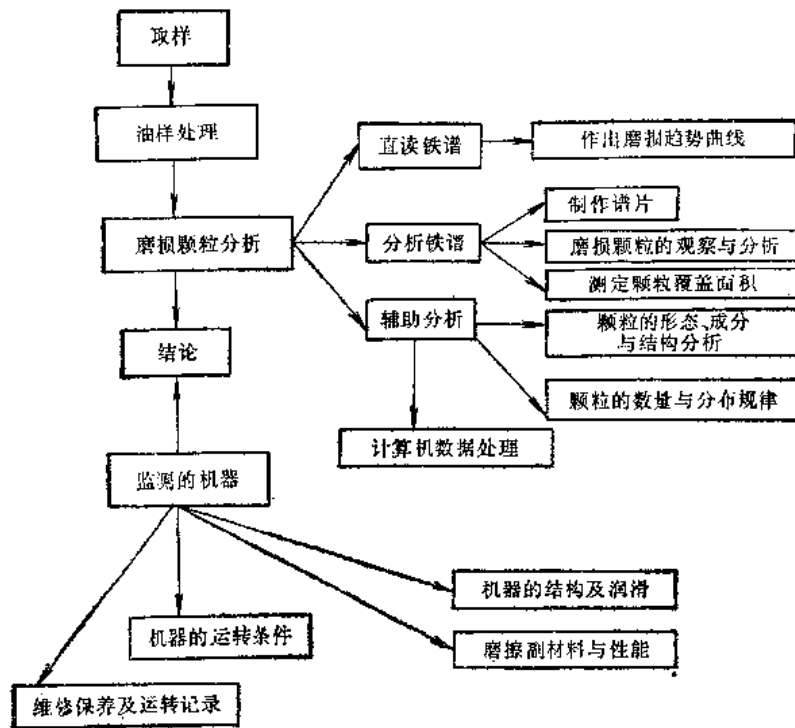


图12-1-3 铁谱技术的示意框图

仪的某些缺点，也仍然属于离线监测。图12-1-3示出铁谱分析监测技术所包含的基本内容。

第2节 铁谱监测与诊断技术

(一) 铁谱仪的原理与结构

铁谱仪包括分析式铁谱仪 (Analytical Ferrograph)、直读式铁谱仪 (Direct Reading Ferrograph)、在线铁谱仪 (On Line Ferrograph) 和旋转式铁谱仪等。其中分析式铁谱仪系统包括谱片制备装置，铁谱显微镜 (Ferroscope) 以及一个用于测量谱片上颗粒覆盖面积的光密度读数计。目前国外作为商品出售的有：包括直读铁谱仪和分析铁谱仪的双联式铁谱仪 (Duplex Ferrograph) 和带两个分析式制谱装置的复式铁谱仪 (Dual Ferrograph)，以及单个直读式铁谱仪 (I型、II型)、在线铁谱仪和旋转式铁谱仪。

1. 分析式铁谱仪

(1) 结构和工作原理 图12-2-1是分析式铁谱仪的工作原理简图。一个具有低稳定速率的微量

泵 (或称蠕动泵) 2 将油样 1 输送到位于磁场装置 4 上方的玻璃基片 3 的上端。倾斜放置的玻璃基片由于与水平放置的磁体之间有一个夹角而在表面形式一个逐步增强的高梯度磁场。油样沿倾斜基片向下流动时，铁磁性金属磨损颗粒在磁场力和液体粘性阻力和重力作用下，按尺寸大小依次沉积在玻璃基片上，并顺着磁力线方向排列成垂直于油样流动方向的颗粒链。废油顺玻璃基片下流，通过导流管 5 排入贮油杯 6。大约4mL的油样从基片上流完之后，用四氯乙烯溶剂洗涤基片，去除残余油液，并使磨损颗粒粘在基片上形成谱片。

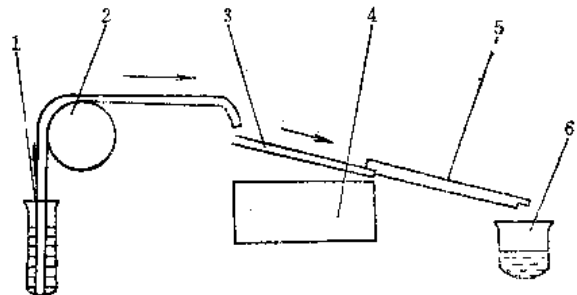


图12-2-1 分析式铁谱仪工作原理图

1—油样 2—微量泵 3—玻璃基片 4—磁场装置
5—导流管 6—贮油杯

图12-2-2是玻璃基片(称铁谱基片)的示意图。铁谱基片(Ferrogram Substrate)的厚度为0.17mm左右。由于谱片需在光密度计上测量颗粒覆盖面积,并在光学显微镜和扫描电镜下观察与分析,故对基片的纯度、均匀度及表面清洁度有一定的要求。基片经特殊处理,在处理后的基片中央用聚四氟乙烯划出一条通道,使从输送管流入基片的油只能顺通道流过而不致溢出。为了描述磨损颗粒在谱片上的位置,把油样通道中任意一点到基片油样出口端的垂直距离称为“谱位”。

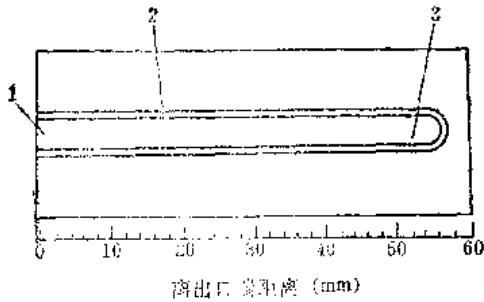


图12-2-2 铁谱基片

1—油样出口 2—极靴 3—油样进口

(2) 磁场装置 分析铁谱仪的核心装置是磁场装置。图12-2-3是磁场装置示意图。这是一个具有约1mm气隙、磁通密度为1.8T(相当于铁的饱和磁化率),垂直梯度分量为4.0~5.0T/cm的高强度磁场装置。

由图12-2-3看到磁铁副安装在轭铁上,并各自带有一个强磁场。这个磁场横穿过气隙平面而到达极靴边缘。当油样流经位于磁体上方的基片时,油样

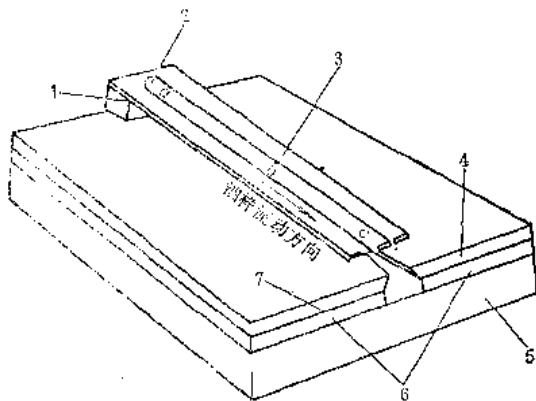


图12-2-3 磁场装置简图

1—台阶 2—油样入口 3—基片 4—右极靴
5—轭铁 6—磁铁 7—左极靴

中的铁磁性磨损颗粒在磁场作用下沉积下来。基片长度方向的中心线位于气隙中央,入口端位于台阶上,基片平面与水平面成一微小角度($1\sim 2^\circ$),使得基片表面磁场强度顺油样流动方向逐渐增强。图12-2-4进一步示出了基片表面磁场的分布。图中圆点表示磁场方向从纸面垂直向上, \times 点表示磁场方向由纸面垂直向下,即磁力线方向是从左极靴到右极靴。点的密度表示磁场强弱,可见,在油样入口处a磁场最弱,而在出口处c最强。这样,油样中的磨损颗粒在基片上流动时,就受到一个逐渐增强的磁场力的作用。

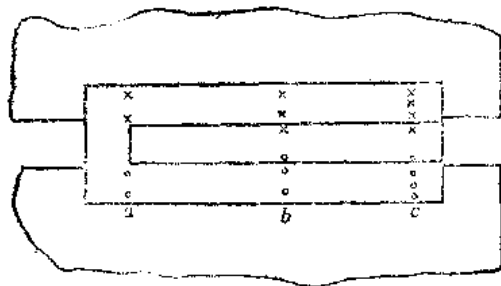


图12-2-4 基片表面的磁场分布

○—磁场方向从纸面垂直向上
×—磁场方向由纸面垂直向下

(3) 磨损颗粒的沉降与排列 当油样流经基片时,油样中铁磁性颗粒受到磁场力作用而逐渐下沉,同时也受到油的粘性阻力作用。因此,磨损颗粒的沉降速度由磁场力和粘性阻力决定。颗粒所受的磁场力与颗粒体积成正比,而阻止颗粒下沉的粘性阻力则与颗粒的表面积成正比,因此沉降速度决定于表面积与体积之比。假设沉降颗粒为一圆球,直径为D,则颗粒所受到的磁场吸力与 D^3 成正比,而粘性阻力与 D^2 成正比,故颗粒所受到的沉降力近似与D成正比。这就导致了大颗粒首先沉降下来,而比较小的颗粒则随油样流到较远处才沉降下来。

在倾斜的基片上流动的油层具有一定的流速和厚度。其中最上层的流速最大,而靠近基片的流体层的流速接近于零。所以,最下层的流体层所携带的粒子(包括小颗粒)几乎一接触基片就立即沉降下来,而携带着大多数小颗粒的最外层流体则把颗粒沉淀到谱片的远处。大约有50%的小颗粒为占流体20%的外层流体所携带。当然,在油样入口处也有一些小颗粒与大颗粒一起沉积下来。

当颗粒通过流体层沉积到基片表面时，由于颗粒与颗粒之间N极与S极相互吸引而排列成垂直于油样流动方向的颗粒链，又因为已经排列成链的粒子与在它上方继续沉降的粒子将互相排斥而分开，故链与链之间将保持一定距离。图12-2-5与表12-2-

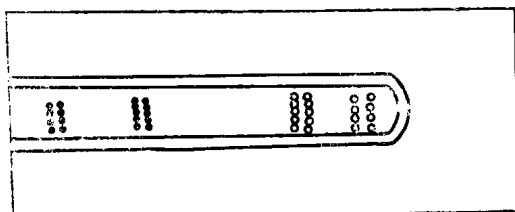


图12-2-5 谱片上磨损颗粒排列示意图

表12-2-1 谱片上不同位置沉积的颗粒尺寸

谱位 (离油样出口端距离, mm)	颗粒平均尺寸 (μm)
入口位置	25
50	1~2
40	0.75~1.5
30	0.50~1.00
20	0.25~0.75
10	0.1~0.5

1给出了磨损颗粒按照上述机理沉降在谱片上的排列情况。

(4) 铁谱显微镜 沉淀在铁谱片上的颗粒，除了金属磨损颗粒外，还有由于氧化或腐蚀等产生的化合物颗粒、润滑油中的添加剂在摩擦过程中形成的各种聚合物以及外来的污染颗粒。为了能区分这些颗粒，并对它们进行形态观察，在铁谱分析中使用双色照明的显微镜即铁谱显微镜。

图12-2-6为铁谱显微镜的照片及其光路原理图， L_1 和 L_2 是两个光源。由 L_1 来的反射光透过红色滤光片 F_1 ，到达半透膜反光镜 M_1 并往下反射，从上方照明谱片 S ；从 L_2 来的透射光通过绿色滤光片 F_2 ，再由反光镜 M_2 从下方照明谱片 S ，绿色透射光线从下方穿过谱片进入镜筒而红色反射光则从谱片表面反射进入镜筒。谱片上的金属磨损颗粒吸收绿色透射光而反射红色反射光，因而呈现红色。氧化物和其它化合物，由于是透明或半透明的，能让光线通过，所以透过绿光显绿色。如果化合物厚度达几个微米，则能部分吸收绿光及部分反射红光，红色光线与绿色光线混合的结果呈现黄色到粉红色。这样，通过颜色检查，便可初步确定颗粒的类型和来源。由于反射光从上方照明，对不能透过透射光的金属磨损颗粒的形态也可以进行观察。

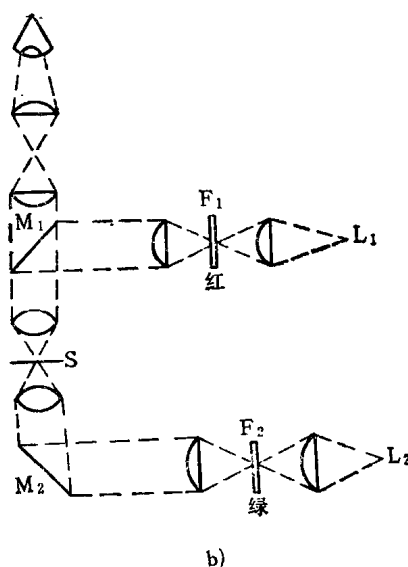
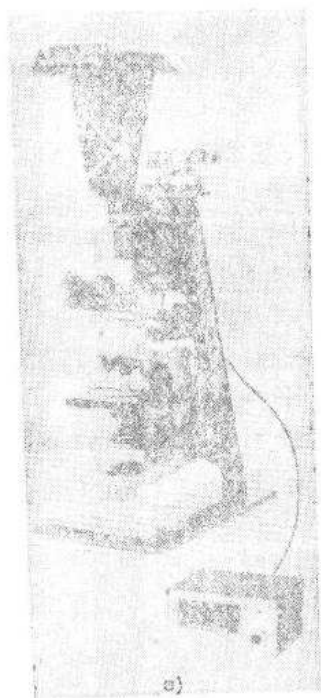


图12-2-6 铁谱显微镜及其光路原理

L_1 —反射光源 L_2 —透射光源 M_1, M_2 —反光镜 S —谱片 F_1 —红色滤光片 F_2 —绿色滤光片

铁谱显微镜上配有放大倍数为100×的高数值孔径物镜，其分辨率为0.26μm，因而能较方便地对亚微米级的磨损颗粒进行观察。由于高数值孔径（数值孔径等于透镜口径半角的正弦与光线所通过的介质的折射率的乘积），物镜能从宽角度接收入射光线，因而特别适用于观察滚动疲劳所产生的球形颗粒。

2. 直读式铁谱仪

图12-2-7与图12-2-8是直读铁谱仪的照片及其结构示意图。直读铁谱仪中磨损颗粒的沉淀原理与分析铁谱仪相类似，只是用一支称为沉淀器管（Precipitator Tube）的玻璃管来代替铁谱基片。当润滑油样被虹吸穿过沉淀器管时，位于管下方的磁场装置使铁磁性磨损颗粒沉淀在管壁上，同样，在高梯度磁场作用下，大于5μm的大颗粒首先在进口处沉淀下来，1~2μm的小颗粒则沉淀在较下游处。在代表大小颗粒的沉淀位置各有一束光穿过沉淀器管，并被放置在沉淀器管另一侧的光电传感器所接收。第1道光束设置在能沉淀大磨损颗粒的管进口处，相距5mm处设置的第2道光束刚好位于小颗粒的沉积位置上。随着磨损颗粒在沉淀器管壁上的沉积，光传感器所接受的光强度将逐渐减弱。因此，数显装置所显示的光密度读数将与该位置上沉积的磨损颗粒的数量相对应。大约2ml油样流过沉淀器

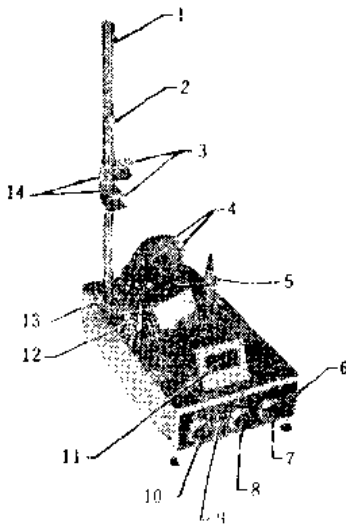


图12-2-7 直读式铁谱仪

- 1—支柱 2—毛细管固定环 3—托架支座 4—光导纤维管 5—磁体 6—开关 7—小颗粒“0”位调节 8—大颗粒“0”位调节 9—颗粒选择开关 10—光源调节 11—显示屏 12—沉淀器管 13—管夹 14—托架

管后，上述两个传感器所测出的光密度读数 D_1 和 D_2 将分别代表大于 5μm 和小于 2μm 的磨损颗粒数量。

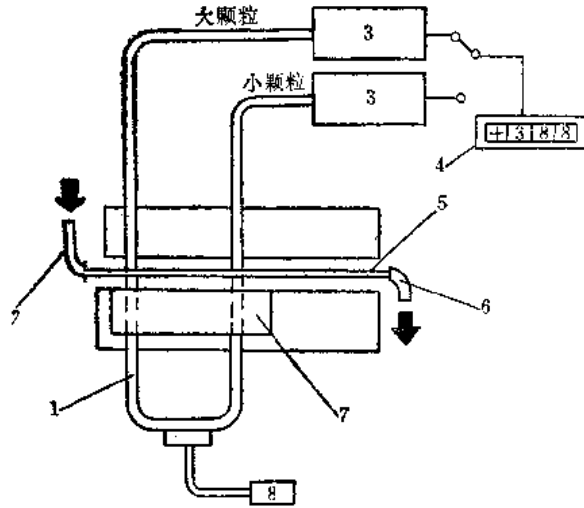


图12-2-8 直读式铁谱仪结构示意图

- 1—光导纤维光导管 2—吸样毛细管 3—光电检测器 4—数显装置 5—沉淀器管 6—废油管 7—磁场装置 8—灯泡

直读式铁谱仪能方便、迅速且较准确地测出润滑油样中大、小颗粒的相对数量，因而对机器状态监测特别有用。但是，直读铁谱仪不能对沉淀的磨损颗粒进行观察与分析。因此在实际应用中，经常是分析式铁谱仪与直读式铁谱仪同时使用，互为补充。

3. 在线式铁谱仪

在线式铁谱仪是安装在机器的润滑油循环管路中，用来随时测出机器中大小磨损颗粒的浓度、监视机器状态的铁谱仪。

图12-2-9中所示为一种在线式铁谱仪的照片，该铁谱仪由两个部分组成。a图部件直接安装在油路上。它由一个收集磨屑的高梯度磁场和一个表面效应电路传感器组成。传感器测出的磨屑浓度及尺寸分布由数显装置（b图）显示出来。在线铁谱仪给出两个磨损颗粒数据：磨屑浓度和大颗粒百分数。磨屑浓度用ppm表示，量程是0~1000。当浓度值达99.9（第一挡）或999（第二挡）时，数显装置将给出警告信号。

在线式铁谱仪测量磨屑数据的方法与分析或直读铁谱仪略有不同。它不是测定油样中的磨损颗粒含量，而是测量达到某一预定磨损颗粒量时所通过

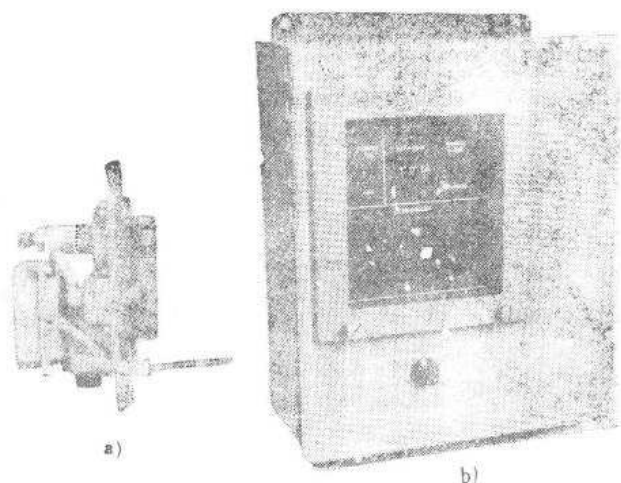


图12-2-9 在线式铁谱仪
a) 测量装置 b) 显示装置

的油样体积。当磨损率增加时，油样中磨屑浓度增加，沉积一定数量磨屑所需的油的体积减少，读数增大。这种方法的优点在于测量范围很宽而且可变，因而使在线式铁谱仪能够应用于各种类型的机器。根据磨屑浓度的不同，一般测量时间可从30 s ~ 30 min。

早期的在线式铁谱仪（7081型）的内部动作可简述如下：第一个动作是冲洗，润滑油经泵打入玻璃管，冲走上次测定时所沉积的粒子。冲洗结束后油泵自动关闭，一个强磁场便自动接通。与此同时，沉淀管上方贮油器里的润滑油靠重力自流而通过沉淀管，粒子按大小沉淀在管壁上，并由传感器测定和在显示屏上给出磨屑浓度与大颗粒百分数。

在线式铁谱仪适用于各种现场机械装备的状态监测，如液压系统，燃气轮机等。同时也适用于各种试验台架上进行的样机试验。

4. 旋转式铁谱仪

分析式铁谱仪进入工业应用以后，发现设计上存在下列缺点：

1) 铁谱片的制备时间过长，因而在生产过程中的使用受到一定的限制。

2) 每制备一个谱片需消耗一支输送管，因而使操作费用提高。

3) 谱片入口区的磨损颗粒往往发生堆积重叠，从而影响对颗粒的观察与分析。

4) 对于颗粒浓度较高的样品需要高度稀释，从而可能造成某些对判断磨损状态有重要价值的颗

粒被漏失，导致判断失误。

5) 蠕动泵在输送油样时的辗压作用使某些大颗粒被碾碎或不能通过。

6) 含有大量积炭的柴油机油样经高度稀释后，谱片上仍留有大量污染物。

因此，英国斯旺西大学在1984年研制了一种利用磁场力和离心力共同作用使磨屑沉降下来的旋转式铁谱仪（RPD）。

图12-2-10所示为旋转式铁谱仪的结构原理图。测定时用注射器式输送管把1CC油样输送到面积大约为30mm²的平玻璃片或塑料片（基片）中心，基片利用定位套定位并使用橡胶密封带固定位置。放置在磁铁上的基片和磁铁装置一起，通过传动轴用可调速的驱动装置带动回转，油样中的磨屑在磁力和离心力的作用下沉淀并排列在基片上形成一系列同心圆。然后用洗涤管从溶剂瓶内吸取溶剂洗涤谱片上的颗粒。颗粒沉

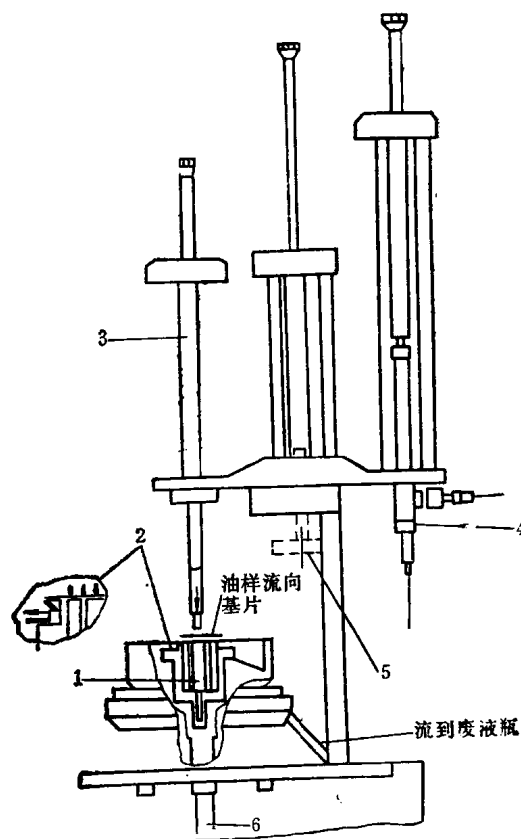


图12-2-10 旋转式铁谱仪原理图
1—磁铁 2—基片固定带 3—注射器式送油管
4—洗涤管 5—基片定位套 6—驱动轴

降时，装置以 70 r/min 的速度旋转，洗涤时再以 150 r/min 的速度旋转，最后再以大约 200 r/min 的速度旋转 $5\sim 10\text{ min}$ ，使之干燥。谱片干燥后拉开固定用的橡胶带使谱片松开并取出。

图12-2-11所示为旋转式铁谱仪所制备的谱片上磨屑排列的示意图。磨屑排列为3个同心圆环，内环为大颗粒，尺寸为 $1\sim 50\mu\text{m}$ ，最大可达几百微米；中环颗粒尺寸为 $1\sim 20\mu\text{m}$ ；外环颗粒尺寸小于 $10\mu\text{m}$ 。对于工业上磨损严重并有大量大颗粒及污染物的油样，采用旋转式铁谱仪制备谱片可以不稀释油样一次制出；对于磨屑比较少的油样也可以增加制谱油样量。制出的谱片还可以在图象分析仪上进行尺寸分布的分析。

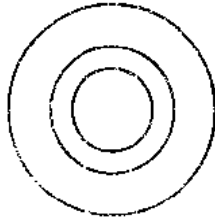


图12-2-11 旋转式铁谱仪制备的谱片上磨屑排列示意图

(二) 铁谱分析操作技术

1. 取样技术

任何一个正常运转的机器，其润滑系统中的磨损颗粒浓度必然要达到动态平衡状态。当颗粒平衡状态遭到破坏时，则意味着机器状态的改变，因此，取样操作首先必须保证所取的油样含有能反映机器上变化的磨损颗粒，才能通过铁谱分析作出正确的判断。否则，油样失去代表性，就可能导致对机器状态作出错误的判断。

(1) 取样位置 在机器润滑系统中的不同位置，磨损颗粒分布情况差异很大。在某些位置，如过滤器前后或油箱上、下部位，颗粒数量与尺寸分布相差悬殊。因此，应遵循下述要点选择取样位置：

- 1) 应始终在机器同一位置取油样。
- 2) 循环润滑系统的管线中取样，应在润滑油流经全部摩擦副之后，即在过滤器之前取样。
- 3) 若油管粗而流速低，应避免从管底部取样。
- 4) 如从油箱中取样，应考虑颗粒沉淀的影响。若停机后取样，取样位置在油面下的深度应随停机时间延长而增加；应避免在底部，箱壁或死角

处取样。

(2) 取样时间 取样时间的选择要着重考虑颗粒沉淀的影响，一般应遵循下述要点：

- 1) 若从润滑管道中取样，则必须在机器运转时取样。
- 2) 从油箱中取样应尽可能在机器运转时进行，若不可能则应在停机后立即取样。
- 3) 应选择在同一运转状态下取样。例如燃气轮机在高功率和低功率运转时生成颗粒的浓度就很不相同。

(3) 取样频率 取样频率主要根据机器的性质和对状态监测的要求来确定，主要应考虑下述几方面的因素：

1) 由于新油在炼制、运输、装卸等过程中可能会进入少量颗粒，因此在机器运转前应对未使用过的新油取样，作为识别非机器本身引入颗粒的判别基准。

2) 新机器或大修后的机器在启动和运转的初期生成的磨损颗粒，常常能反映出诸如安装不良、零件不合格、设计不当等缺陷，或超速超载等不当的运行规范，因此应在机器运转后一小时内取一次样。

3) 新机器或大修后的机器在跑合阶段应增加取样频率，以便及时发现不正常现象，保证正常跑合。

4) 进入正常磨损阶段后，取样间隔可加大，并根据机器性质与监测要求确定取样频率。推荐下述取样频率作为参考：

飞机燃气轮机	50 h
飞机液压系统	50 h
柴油发动机	200 h
重载传动装置或齿轮箱	200 h
地面液压系统	200 h
重载燃气轮机	250~500 h
蒸汽轮机	250~500 h
大缸径往复式内燃机	250~500 h

(4) 取样工具 取样工具包括安装在润滑油管线上或油箱中的取样阀、管等以及抽样工具，贮样瓶等。对其主要要求是：

- 1) 置于管线和油箱中的永久性取样阀、管等，在取样前应放掉两倍于残留油体积的油样，保证所取油样中不含有上次取样时的残留油样。
- 2) 抽样器、贮样瓶应经清洗、烘干。

3) 取样工具应不被油样腐蚀、溶解。

4) 贮样瓶最好采用浅色、透明、带四氟乙烯帽垫瓶盖的玻璃瓶。

5) 油样量不应超过贮样瓶容积的 3/4，以便在铁谱分析前把油样摇晃均匀。

2. 样品处理

由于目前的铁谱仪在性能、结构上的某些局限性，为了保证分析数据的可靠，从机器中取出之油（脂）样应经过一定的处理才能进行铁谱分析。

(1) 加热与搅拌 目的在于使原始采集油样中的颗粒分布均匀，以便从中取出具有代表性之样品。

1) 加热温度：65±5℃；加热时间：大于30 min.

法，使油脂试样溶解成具有适当粘度的液体样品，以便制备谱片。

1) 推荐使用下列溶剂，

正己烷 + 甲苯

比例：甲苯：正己烷 = 3：7

2) 所取润滑脂应具有代表性，数量至少应在 50mg 以上。

3) 将润滑脂放入已盛有 10~20mL 溶剂的透明玻璃瓶中，瓶的大小应保证有 1/3~1/4 空余体积，以便摇匀。

4) 可将样品瓶置于超声振荡器（或超声清洗槽）中振荡数分钟，再用手摇匀；亦可放直径 3~5mm 的玻璃球 10~20 粒于瓶内密封摇匀。

5) 甲苯 + 正己烷溶剂可同时作固定剂使用。

4. 谱片的光学检查

谱片的光学检查采用铁谱显微镜，通过变换光源，放大倍数和谱片位置等方法对谱片上的磨损颗粒进行观察，以获得关于颗粒形态与成分等信息。

谱片光学检查应按一定的程序进行，表12-2-2为常用的谱片光学检查程序。检查结果应尽可能详细地记录到铁谱分析报告单内。表12-2-3为铁谱分析报告单(供参考)。

谱片光学检查操作的要求如下：

(1) 谱片光学检查首先从低倍(100×)开始。用100×和红色反射光、绿色透射光照明，从谱片上油样入口处开始对整个谱片上沉积的颗粒作扫描观察，寻找非正常磨损颗粒、非金属大颗粒或腐蚀磨损沉积的特征性颗粒。由于放大倍数低，2~5 μm 以下的金属颗粒均呈黑色，无法分辨清单个颗粒，只有大于10 μm 的金属颗粒会呈现出红色。因此，在正常磨损情况下，谱片上一般将观察不到红色粒子。非金属颗粒在双色照明下将呈红-绿之间的各种过渡颜色。腐蚀磨损将在油样出口端呈现特征性大片状沉积。

(2) 逐步提高放大倍数。这时主要采用白色反射光和绿色透射光观察入口区，检查是否存在非正常磨损的较大颗粒。根据颗粒尺寸、形态、颜色、取向、所处位置等，识别其类型、材质，从而推断其产生形式及来源。采用白色反射光便于观察金属颗粒本身颜色，绿色透射光便于根据颗粒是否能透过光线来判断其材质。高放大倍数1000×主要用于观察粒子表面细节、寻找球状颗粒以及细小的切屑状颗粒，判别颗粒表面氧化程度。

(3) 偏振光照明可用于判别非金属颗粒、磨料、氧化物。低倍(100×)透射偏振光照明可迅速分辨出非金属与金属颗粒。高倍(400×和1000×)反射偏振光照明可用于观察粒子表面特征、氧化程度，也可用于发现在100×下不易发现的细小非金属颗粒。

(4) 谱片加热法能简便地判别颗粒成分。为此，在加热前应对待判别的颗粒进行拍照并与加热后的颜色进行对照。

通常，光学检查程序可按表12-2-2所示进行。检查结果可按表12-2-3的格式进行登记。也可自行设计更详细合用的表格。

5. 谱片加热法

铁谱片上不同成分的钢铁磨损颗粒被加热时，

表12-2-2 常用的谱片光学检查程序

放大倍数	反射光	透射光	分析内容
100	红	绿	在这种放大倍数下，正常磨损颗粒的尺寸很小，无法看清，故呈黑色。所以，如果谱片上仅有正常磨损颗粒，则观察不到红色粒子；出现红色粒子，则表明存在严重磨损颗粒。检查时先观察油样入口处，然后移动工作台观察整个谱片，寻找非金属、金属粒子，再观察油样出口处，检查有无腐蚀磨损的特征。
400	白	绿	检查油样入口处，初步判断有无诸如严重磨损、正常磨损或块状磨损粒子。移动工作台观察整个谱片，检查有无有色金属颗粒，或其它具有明显特征的非金属颗粒。
1000	白	绿	提供关于颗粒表面的细节情况，如有无裂缝、擦伤等。球状颗粒一般可以在此倍数下看到。这种粒子一般来源于滚动轴承。可以看到小切削磨损颗粒以及粒子表面的回火色斑；区别氧化颗粒(表面较光滑)与游离金属粒子(表面较粗糙)；区别无定形材料与聚合物，聚合物当中常含有小颗粒金属粒子。
100	不用	偏振	在此情况下，非金属粒子是明亮的。
400	偏振	不用	确定粒子表面特征，粒子的氧化激烈程度，可以看到100倍下不易发现的小非金属粒子。若有需要，可用1000倍进一步观察。
根据需要			加热谱片进行观察，但在加热前应对粒子进行拍照，因为加热后某些粒子可能会变色。若要区别有机或无机粒子，用偏振光比较合适。加热后有机粒子将不那么亮，加热后可扫描金属粒子的表面细节以及可疑的Pb/Sn粒子。
根据需要			必要时可再次将谱片加热到更高的温度，检查谱片并拍照。

表12-2-3 铁谱分析报告单

来样单位: _____ 日期: _____
 谱片号: _____ 样品号: _____
 设备类型: _____ 设备系列号: _____
 取样日期: _____ 运转时间: _____
 润滑油型号: _____ 油使用时间: _____
 D、R 读数 (每 mL): L _____ S _____
 制谱用未稀释油体积: _____
 覆盖面积百分数: A_L _____ A_S _____

颗粒类型	没有	少量	中量	大量	主要尺寸
正常摩擦磨损颗粒					
严重磨损颗粒					
切削磨损颗粒					
厚片					
薄片					
球状颗粒					
深色金属氧化物					
红色氧化物					
腐蚀磨损颗粒					
有色金属颗粒					
摩擦聚合物					
摩阻材料					
有机物					
泥砂					
纤维					
特殊颗粒					

注: 1. 磨损状态的判断结论: 正常 注意 警告

2. 没有: 表示无此颗粒; 少量: 表示覆盖面积百分数为 1%~5%; 中量: 表示覆盖面积百分数为 5%~25%; 大量: 表示覆盖面积百分数为 >25%。

3. 填写时在空格内打“√”, 写上颗粒主要尺寸。

表12-2-4 四种材料颗粒的回火色

试验材料	其它同类材料	回火色			
		330°C	400°C	480°C	540°C
GCr15	碳钢和低合金钢	蓝色	淡灰色		
含碳 3.5% 的生铁	中合金钢大约 3%~8% 合金	退色到古铜色	深古铜色带蓝斑点		
A 型铍钢	高镍合金	无变化	无变化	古铜色, 大多数颗粒带蓝色	所有除了带蓝色或蓝灰色
OCr18Ni9 不锈钢	高合金钢	无变化	一般无变化, 某些颗粒带淡黄色	浅古铜色。一些颗粒带淡黄色	大多数颗粒仍有古铜色, 一些颗粒显示蓝色
有机物	-	因材料不同而烧焦, 收缩或蒸发			

由于表面被氧化生成氧化膜而会出现不同的颜色, 通常把这些不同颜色称为磨损颗粒的回火色。利用这一变化, 我们可以采用加热到不同温度的办法来区别出不同材质的磨损颗粒, 如钢、铸铁、不锈钢和镍合金等。表12-2-4是上述4种材料的加热法识别规范。

谱片的加热可采用能控制加热温度的电炉或烘箱等加热器。加热温度分4个等级, 分别是330°C、400°C、480°C和540°C。将谱片放入已调好温度的加热器, 保温90s, 然后取下冷却到室温, 在铁谱显微镜上用白色反射光和绿色透射光进行观察和拍照。颗粒的尺寸大小对回火色有影响, 所以谱片加热法主要用于判断入口处的大颗粒成分。

6. 扫描电子显微镜和X-射线能谱分析

利用扫描电子的大焦深可以更清晰地观察磨损颗粒, 而X-射线能谱分析则用于准确地确定颗粒成分。

(1) 谱片的扫描电镜分析步骤

- 1) 谱片首先应经铁谱显微镜观察, 确定需经扫描电镜观察的位置与颗粒。
- 2) 对需经扫描电镜观察的部位及颗粒从低倍(100×)到较高倍拍照, 以便扫描电镜分析时确定应观察的位置与颗粒。
- 3) 根据扫描电镜样品室大小决定是否应将谱片切割, 以及切割后的尺寸。
- 4) 对谱片进行喷镀。从观察颗粒形态效果考虑是喷金。为便于X-射线成分分析, 则最好喷碳。
- 5) 对照已拍好之照片, 在扫描电镜下选择观

察, 倍数由低至高。

(2) 谱片X-射线铁谱分析步骤

- 1) 首先在铁谱显微镜下选好光学显微镜不能确认而需X-射线能谱仪进行分析的颗粒与部位。
- 2) 选择适当的倍数拍照以便查找。
- 3) 对谱片喷镀, 根据需要决定喷镀金或碳。
- 4) 选择合适的加速电压。过高的电压会使射线到达基片, 而使成分数据不精确。
- 5) 根据谱片上颗粒分布及需要分析的颗粒的情况, 选用点、线或面扫描分析方式。
- 6) 根据需要确定定性、半定性或定量计算方法。

(三) 磨损颗粒的识别与润滑磨损工况的判别

铁谱技术的核心是磨屑形态与机械润滑磨损工况之间的关系。自从铁谱技术问世以来, 大量的研究工作都是用于磨损颗粒的识别以及如何用定性或定量的方法来对其进行分类及与实际工况联系起来。1976年, 美国E.R.Rowen和V.C.Westcott根据他们的研究成果编制了第一册《磨损颗粒图谱》(Wear Particle Atlas)。将钢铁类磨损颗粒分为5类, 从而成为磨损颗粒识别与工况监测判断的指南。1984年, 美国海军航空工程中心(The Naval Air Engineering Center)汇集英美铁谱技术工作中积累的资料, 在《磨损颗粒图谱》的基础上, 增加了有色金属和其它非金属、污染物等颗粒的图谱, 并且列举了柴油机、燃气轮机、齿轮、液

压系统、滑动轴承等工况监测与磨损分析的实例，出版了《磨损颗粒图谱》（再版本），该图谱汇集了許多著名的学者和英美研究实验部门铁谱技术的实验结果，从而为磨损颗粒的识别以及润滑磨损工况的铁谱监测技术奠定了基础。

1. 钢铁磨损颗粒的识别

在铁谱技术中，根据对使用铁谱仪分离出来的磨损颗粒形态进行研究的结果，把磨损颗粒归纳为下列5种基本类型：

- 1) 正常磨损颗粒，也有译为“摩擦磨损颗粒” (Rubbing Wear Particles)；
- 2) 切削磨损颗粒 (Cutting Wear Particles)；
- 3) 滚动疲劳磨损颗粒；
- 4) 滚-滑擦伤磨损颗粒；
- 5) 严重滑动磨损颗粒。

钢铁5种基本类型磨损颗粒的特征及识别方法：

(1) 正常(摩擦)磨损颗粒 摩擦磨损颗粒(或称正常滑动磨损颗粒)是指机器正常运转状态下由于滑动摩擦而产生的磨损颗粒，是机器正常滑动的结果。

当摩擦面磨合时，其表面会形成一层特殊的光滑表层。因此，摩擦面的磨合可以定义为精加工表面向光滑低磨损表面转变的阶段。对钢来说，磨合期间，两表面的机械作用破坏了金属的晶体结构，产生了一个厚度大约为 $1\mu\text{m}$ 的短程晶序箔层(其晶格范围大约为 $0.03\mu\text{m}$)，这一层称为剪切混合层(Shearmixed Layer)。剪切混合层在形成过程中呈现超塑性，它可以沿表面流动到等于其厚度几百倍的距离。剪切混合层在压力下具有流动性的能力导致摩擦副表面变得很光滑。金属表面只要存在一个稳定的剪切混合层，机器就处于正常磨损状态。但如果这一表层的破坏速度超过了其形成速度，磨损颗粒的尺寸就将迅速增大，这时最大的磨损颗粒尺寸将由 $5\sim 15\mu\text{m}$ 增大到 $50\sim 200\mu\text{m}$ ，磨损速率也将很快增大，机器将由正常磨损状态进入严重滑动磨损状态。

应用铁谱技术分离出来的磨损颗粒的照片表明这些颗粒是一些很薄的片屑，它们的扫描电镜照片更加清楚地表明是一些具有光滑表面的鳞片状(Flake Like)粒子。通常其尺寸范围在 $15\sim 0.5\mu\text{m}$ 或更小一些，厚度一般为 $0.15\sim 1\mu\text{m}$ ，较大的颗粒厚

度与最大尺寸之比例大约为10:1，而 $0.5\mu\text{m}$ 左右的颗粒其比例则大约为3:1。研究结果表明，它们是剪切混合层部分剥落的结果。金属表面在摩擦力的周期性反复作用下，剪切混合层发生疲劳产生小片剥落，从而形成正常的摩擦磨损颗粒。这一层不断剥落又不断新生，从而形成一个稳定的磨损表面，机器就处于正常的摩擦磨损状态。

当机器处于正常的摩擦磨损状态时，往往还可以在机器的磨合期间找到一些比上述颗粒大一些的粒子。这些较大的颗粒则是表面由粗糙趋向光滑的过程中，凹凸不平的表面被剪切混合层所覆盖。有时，这一层的某些部位被支架在原来的断口或低洼面上，然后发生断裂，脱落，从而形成这些较大的片状摩擦磨损颗粒。

当润滑系统中存在过量的杂质时，零件的磨损率可能在剪切混合层还没有完全破坏时就增大到超过某个数量级。这时，虽然还不致于发生灾难性的破坏，但这样的系统会很快磨损。在这种情况下，虽然主要的磨损颗粒还是正常的摩擦磨损类型，但其数量明显增加，预示故障即将发生。此时，磨损颗粒的实际增加量将取决于杂质的数量和类型。配合面硬度大致相同的零件，诸如柴油机的气缸壁和活塞环之类的摩擦副就容易出现这种情况，这时谱片上的颗粒中杂质颗粒与箔屑同时存在着。

经过磨削加工或其它精加工的表面在磨合期间还会产生一些长条状或扁平状的颗粒。在磨合期间，金属表面的加工条纹的峰脊被弯折后沿着峰顶形成一些“檐板”。这些檐板随后以长条状或扁平状粒子的形式脱离表面。这些颗粒的数量将随着表面加工痕迹被磨掉或覆盖掉而不断减少，它们在谱片上的位置多数集中在油样的入口处附近。

图谱①12-2-1、图谱12-2-3显示的是柴油机磨损颗粒。图中的颗粒位置靠近入口处，这里的最大正常摩擦磨损颗粒也就是样品中的最大颗粒(达 $15\mu\text{m}$ 左右)。

必须注意弱磁性的颗粒在谱片上将沉积在更远一点的位置上，故在一个视域中的非铁磁性颗粒和化合物颗粒都大于钢铁颗粒。因此，还可根据颗粒所在的位置来鉴别颗粒的成分并由此判断发生磨损的是那一个零件。

图谱12-2-2显示的是经过磨削加工或机械精加工的表面磨合期产生的典型粒子。磨合期间，表面

① 图谱均附于本书之后——编者注。

的波峰被推平并从峰顶上折下来成为“檐板”，这些“檐板”随后断裂下来变成照片上的那些长条状或扁平状的颗粒。

(2) 切削磨损颗粒 是形状像车床切削的磨损颗粒，它们是滑动表面微凸体互相切入产生的磨屑。产生切削磨损有两种方式：

1) 当滑动面上的某个硬组份因碎裂而产生带锐边的断口时，所产生的硬锐边会刺入配偶滑动面之中，产生平均宽度为 $2\sim 5\mu\text{m}$ 、平均长度为 $25\sim 100\mu\text{m}$ 的粗大的切削磨损颗粒。有时，滑动面之间存在一个硬屑夹杂物，这时也会产生一些长约为 $5\mu\text{m}$ ，厚约为 $0.25\mu\text{m}$ 的较小的切削磨损颗粒。

2) 当滑动系统中存在某些硬的磨料（例如砂粒或来自系统另一部分的磨屑）时，它们也会嵌入软的表面之中（例如轴承衬套）。这些磨料颗粒的某些部分仍然突出于软表面而侵入到配偶滑动面之中，从而产生切削磨损。这种切削磨损颗粒的最大尺寸与润滑油中磨料粒子的尺寸大小成比例，有时也可能产生厚度仅为 $0.25\mu\text{m}$ 的线状颗粒。但是，必须注意的是，系统中存在磨料杂质肯定会增大磨损速率，却并不一定产生切削磨损颗粒。例如，对于两个硬度相近并高于磨料硬度的滑动面，磨料的存在就只能增大磨损速率而不产生切削磨损。

切削磨损颗粒属于非正常磨损产生的颗粒，对于它们的出现和数量应作仔细监测。如果系统中大多数磨损颗粒是几个微米长和几分之一微米宽，则应怀疑存在磨料杂质；如果系统中大的切削磨损颗粒（例如长度 $50\mu\text{m}$ 以上的颗粒）数量增加，则表明磨损组件的失效已迫在眉睫了。图谱12-2-4为喷气发动机油样中的切削磨屑，图谱12-2-5为单个切削磨屑。

(3) 滚动疲劳磨损颗粒 滚动轴承的疲劳会产生3种不同形态的磨损颗粒。它们是疲劳碎片（Fatigue Spall Particles）、球状颗粒和层状颗粒。

1) 疲劳碎片是从表面的凹坑中剥落的碎屑。在微观剥落期间，这些颗粒的最大尺寸可达 $100\mu\text{m}$ ，颗粒进一步增大，这种剥落就从微观变为宏观，从而使零件失效。不正常磨损的初期预报，是大于 $10\mu\text{m}$ 颗粒的数量增加。这些颗粒的主要尺寸与厚度之比约为10:1，它们有一个光滑的表面和任意而不规则的周边。出现这种颗粒，表明机器零件性能已严重劣化。但对于某些装置，产生这种颗粒的数量

可能较少，因此，分析者具有识别这种颗粒的能力是很重要的。

2) 滚动轴承疲劳球状颗粒是在轴承的疲劳裂纹中产生的。球状颗粒的出现可以作为轴承出现故障而需要改变磨损状况的一种预报，因为这种球状颗粒往往可在轴承产生疲劳剥落之前被检测到。当然，人们也发现，在清洁的润滑系统中有一些在高负荷下进行试验的轴承，虽然已经疲劳却并没有产生球状颗粒。因此，看来没有球状颗粒也不能排除滚动轴承发生疲劳的可能性。然而，在工业系统的监测中，目前发现滚动轴承的疲劳都是在产生了大量直径在 $1\sim 5\mu\text{m}$ 的球状颗粒之后才发生的。据估计，轴承在疲劳失效过程中将产生数百万个球状颗粒。

气蚀、焊接和磨削过程也可能产生某些球状的磨损颗粒，但滚动疲劳产生的球状颗粒尺寸几乎都在 $3\mu\text{m}$ 以下，而由焊接、磨削和气蚀（空穴作用）等产生的球状颗粒往往大于 $10\mu\text{m}$ 。没有使用过的润滑油中有时也会带有一些球状金属颗粒。因此，为了避免把杂质球状颗粒和轴承疲劳产生的球状颗粒相混淆，无论取样或分析都应仔细判断。

3) 滚动疲劳产生的层状颗粒是一些非常薄的平片，其厚度只有平面方向最大尺寸的 $1/30$ ，而最大尺寸则大约为 $20\sim 50\mu\text{m}$ 。它们是磨损颗粒被滚动碾压而成的薄片，表面常常带有一些洞穴。层状颗粒在轴承的整个使用期内都会产生，但在发生疲劳剥落时，其生成数量增加。因此，当发现球状颗粒，同时层状颗粒数量又增加时，表明滚动轴承已开始出现会导致疲劳剥落的显微裂纹，这些裂纹进一步发展就会引起严重的疲劳剥落。

图谱12-2-6是滚动轴承发生疲劳剥落所产生的颗粒，它具有光滑的表面和不规则的外形周边。滚动疲劳所产生的摩擦磨损颗粒较少，大颗粒（ $20\mu\text{m}$ ）对小颗粒（ $2\mu\text{m}$ ）的高比例是纯滚动疲劳的典型特征。当然在整个机器的油样里极少看到摩擦磨损颗粒很少的情况，因为这时除了轴承之外，机器的其他滑动部位会产生很多摩擦磨损颗粒。

图谱12-2-7是滚动疲劳碎片，它们都有不规则的形状和大小不同的尺寸。由于球体的曲面把光线反射发散而不能进入物镜，因此，要看到金属球必须使用能从宽角度上接受光线的物镜，即高数值孔径物镜（数值孔径 NA 是入射半角的正弦）。适宜于观察球体的物镜数值孔径必须在 0.85 以上。利用

球体表面的凸效应，如果在反射光源束的某一恰当位置上放入一个物体，就可以在球体的表面上出现该物体的影像，而这种现象在任何其它形状的粒子上都不会出现。因此，利用这种方法可以判断在显微镜中所观察到的是否为球状粒子。

必须注意，某些润滑系统中可能产生一些与磨损无关的塑料球状颗粒。这时可利用双色显微镜根据它们的透光能力加以判断。在双色照明的情况下，塑料球状颗粒呈现绿色，而金属球状颗粒则为红色。此外，谱片上有时还会出现一些由油中的聚合物粘在一起的球状颗粒，它们往往是半透明的。为了判断它们是否是金属球，可以把谱片加热到330°C，这些由聚合物粘在一起的球状颗粒就会熔化而散开，变成一种。在显微镜下，其面积就明显扩大，据此即可判断为非金属球状颗粒。

图谱12-2-8是轴承疲劳产生的各种球状颗粒。

图谱12-2-9是轴承滚动疲劳产生的层状颗粒。它们的厚度不超过1 μm 。

(4) 液-液磨损颗粒 这是齿轮疲劳和擦伤所产生的磨损颗粒。齿轮在低速高负荷下超载磨损所产生的颗粒则划归“严重滑动磨损颗粒”。润滑油中存在磨料所产生的磨损颗粒则划归“磨料磨损和切削磨损颗粒”。

齿轮节线疲劳所产生的磨损颗粒与滚动轴承疲劳所产生的颗粒有许多共同之处。一般来说，它们都有一个光滑的表面和不规则的形状，但随着齿轮设计的不同，颗粒的主要尺寸与厚度的比例在4:1到10:1之间变化。由于齿轮啮合时表面存在拉伸应力，此应力将促使疲劳裂纹扩展至深处然后发生点蚀(Pitting)，从而产生块状颗粒(Chunk Particles)。

与滚动轴承的疲劳相似，齿轮疲劳产生的大颗粒(大于20 μm)的比例也较高。

齿轮的划伤或擦伤起因于负荷或速度太高(或者两者兼有)，这时表面过高的温度使润滑膜破坏并引起啮合齿面发生粘着。粘着磨损使表面粗糙化并导致磨损率增大。受影响的区域是轮齿承受高负荷和高滑动速度的部位，亦即在节线到齿顶或齿根的区域。通常一旦发生擦伤，每一个齿都受影响并出现大量磨屑。

由于齿轮啮合时齿面上不同接触点的滑动速度和滚动速度有较大的差异，所以，所产生的磨损颗粒特征也有相应的差异。齿轮划伤时所产生的大颗

粒的数量与小颗粒数量的比例是低的，而且大小颗粒的表面都很粗糙呈锯齿形圆边。根据这些特征也可以将划伤产生的小颗粒与摩擦磨损颗粒区分开来。某些大颗粒的表面存在有由于滑动接触留下的条纹。由于划伤时的高温，通常还会出现一定数量的氧化物，一些大颗粒可能出现部分氧化的迹象，其氧化程度取决于润滑和划伤的程度，颜色可以从棕色到蓝回火色。

图谱12-2-10是齿轮疲劳磨损颗粒。大小颗粒的高比例是明显的，而且大颗粒的表面是光滑的。

图谱12-2-11是一个齿轮疲劳磨损颗粒，它具有不规则形状的磨粒。

图谱12-2-12是典型的划伤磨损颗粒。如果把图谱12-2-12同图谱12-2-1作比较，则可以看出小的划伤磨损颗粒与摩擦磨损颗粒之间的明显差别。带有摩擦条纹的大颗粒可能是在靠近滑动速度最高的齿根或齿顶处产生的，而不带条纹的颗粒则是在最接近节圆处产生的。

(5) 严重滑动磨损颗粒 当滑动表面由于负荷或速度过高而使应力变得过大时，会出现严重滑动磨损。这时，剪切混合层变得不稳定，出现大颗粒脱落，使磨损率逐步增大。如果滑动表面的应力更进一步加大，就会达到第二个转折点，这时，整个表面发生破坏并达到毁灭性的磨损速率。

大小颗粒的比例取决于表面应力超出极限的程度，应力级别愈高，比例也愈高。如果逐渐提高应力，那末就可以看到，先是小的摩擦磨损颗粒的数量逐渐明显增加，然后才出现大的严重滑动磨损颗粒。

严重滑动磨损颗粒的尺寸在20 μm 以上，由于滑动摩擦的结果，某些颗粒的表面出现滑动的条纹，它们常常有整齐的刃口并且主要尺寸对厚度的比例大约为10:1。当磨损趋向剧烈时，粒子上的条纹和直线刃口愈加明显。

图谱12-2-13是典型的严重滑动磨损的颗粒，大小颗粒的高比例是应力等级远远超过表面所能承受的强度的反映。

2. 有色金属磨损颗粒的识别

根据有色金属在谱片上的非磁性沉淀方式，可以从金属颗粒中将它们识别出来。有色金属颗粒不按磁场方向排列，以不规则方式沉淀，大多偏离铁磁性颗粒链，或处在相邻两链之间。

有色金属颗粒通常沿谱片全长沉积，而主要尺寸大于2~3 μm 的铁颗粒不会沉积在谱片1~50mm

表12-2-5 白色有色金属颗粒的识别

	0.1N 浓度 HCl	6.1N 浓度 NaOH	330°C	400°C	480°C	510°C
Al	溶解	溶解	不变	不变	不变	不变
Ag	不溶	不溶	不变	不变	不变	不变
Cr	不溶	不溶	不变	不变	不变	不变
Cd	不溶	不溶	棕褐色	—	—	—
Mg	溶解	不溶	不变	不变	不变	不变
Mo	不溶	不溶	不变	从黄到有些深紫色		—
Ti	不溶	不溶	不变	微棕色	棕黄	深棕色
Zn	溶解	不溶	不变	不变	棕黄	蓝棕色

① 在某些情况下可以变得亮些。

的位置。所以，在离开谱片上油样进口点一定距离以外处若发现大于几微米的金属颗粒，一般是有色金属颗粒。图谱12-2-14为沉积在谱片出口处附近的铝颗粒，而毗邻的颗粒链则是一些小的铁颗粒。

(1) 白色有色金属磨损颗粒 在使用光学显微镜检测谱片时，实际上不可能将白色有色金属区分开来。除非其上覆盖有氧化物或化合物，否则，它们一般都呈白色且具光泽。鉴别它们的有效方法是X-射线能谱分析。

当无可能使用X-射线能谱分析谱片上的颗粒时，推荐用表12-2-5列出的化学热浸蚀方法进行分析。表中头两列是用0.1N的盐酸或苛性钠溶液滴在已加热到90°C的谱片上，观察待识别的白色有色金属颗粒是否发生溶解。加热是为了促进化学反应和加速液滴的蒸发，液滴应尽可能小，以免使颗粒移位。表中后四列是白色有色金属颗粒在谱片加热法中的颜色变化。采用化学热浸蚀法，除了银和铬互相不能区分之外，表中其它有色金属都能区分开来。

(2) 铜合金磨损颗粒 铜合金具有特殊的红黄色，因而易于识别。但是，也有某些金属颗粒由于生成时的过热而呈现黄褐回火色，这可能会导致与铜合金颗粒混淆。一般，黄褐色的铁磁性颗粒不易被混淆，因为它具有磁性沉淀方式；其它金属像钛、奥氏体不锈钢或巴氏合金，在某些条件下也可能呈黄褐色。但是，在大多数情况下，其颜色不会像铜合金那么均匀一致，而在任何环境下，它们也都不会具有铜合金那样的微红色。

当谱片上铜颗粒被加热或在生成期间受到热的

作用时，它们本身会形成回火色。可是这些颜色变化无助于鉴别铜合金的类别。因为许多种铜合金均可能发生这些颜色变化，而同样的合金也可能有不同的颜色反应，这要取决于它们的晶体结构、相偏析以及磨损过程引起的早期塑变。

图谱12-2-15为谱片出口处附近铁磁性颗粒链之间的铜颗粒。图谱12-2-16显示出该谱片加热到330°C以后的同一图像。图谱12-2-17则为从火车滚子轴承的润滑脂中得到的铜颗粒，暴露部分被氧化变成暗灰色。在这个样品中，相当多的铜颗粒完全是灰色的。以上3种照片显示出了铜合金按照它们经历的情况可能出现的色彩变化。

(3) 铅-锡合金磨损颗粒 由于铅-锡合金熔点较低而延性极好，通常是以涂抹而不是破裂的方式形成颗粒，因此在谱片上不常遇到许多游离的铅-锡合金颗粒。在谱片上发现铅锡颗粒时，它们多数已发生氧化。氧化磨损是轴颈轴承的一种重要失效形式，它是润滑不良以及启动、停机时动压油膜难以形成而发生的。拆开这类失效的轴承便可发现由于铅锡合金氧化而生成的“黑疤”。

铅锡合金轴承的其它两种主要失效形式是污染和腐蚀。污染可通过发现非金属颗粒以及轴的切削磨损来判断。腐蚀磨损最常发生在内燃机，尤其是柴油机中。这时在谱片出口处将有大量细小颗粒沉淀。柴油机燃料中的硫会形成硫酸，而在汽油机或燃气轮机中，当润滑油氧化时会形成有机酸，这些都腐蚀铅锡轴承，并加速活塞环与活塞的磨损，其中铅比锡更易于腐蚀。

在一些失效的轴颈轴承中，除了氧化的谱片颗

粒以外,还可能发现极易识别的铜合金颗粒。在这些轴承中,铜合金上镀有薄层的巴氏合金。铜合金使轴承具有较高的疲劳强度,而巴氏合金使轴承表面具有所要求的特性。这种结构的轴承特别适合于采用铁谱分析。这是因为一旦发现大量的铜合金颗粒就可肯定轴承已经发生剥落。

为了识别轴承合金,可用细金刚砂纸或碳化硅砂纸磨下一些轴承金属,使其分散在滤过的油中并制成铁谱片以观察该金属呈现的外观,然后把铁谱片放在热盘上加热,每次升温大约 100°F ($\approx 37.8^{\circ}\text{C}$)一直升到 1000°F ($\approx 538^{\circ}\text{C}$)。这个温度是允许加热最高温度,若温度再高,谱片玻璃很可能卷曲。每次加热保持90s,然后,观察巴氏合金颗粒。典型的氧化铅锡颗粒具有多色彩的外形,在低放大倍数下它们是微黑色的,但在400或1000倍下,表面上将看到蓝色和桔红色的斑点。图谱12-2-18为往复式飞机发动机油样中的一个铅锡合金颗粒(谱片未经热处理)。

铅锡合金的熔点低于谱片加热法的第一级加热温度(330°C),它们在表面张力作用下形成圆球,然后变成粗大的氧化物,并出现上述多点彩色外形,这是由于铅锡合金在高温下发生氧化引起。

图谱12-2-19和图谱12-2-20为加热到 330°C 前后的高锡巴氏合金颗粒。照片中的颗粒是从电厂 $5884 \times 10^2 \text{W}$ (800马力)离心风机轴承的油样中取得的。

3. 氧化铁颗粒的识别

为了便于识别,将谱片上出现的氧化铁颗粒分为3种,即红色氧化铁,黑色氧化铁和暗黑色氧化铁。一般来说,红色氧化铁是润滑系统中有水分时出现的产物;黑色氧化铁是润滑不良及温度过高时的磨损产物;而暗黑色氧化物,则是严重缺油产生高热促使金属颗粒表面严重氧化的结果。

(1) 红色氧化铁 x -射线衍射分析表明红色氧化铁的主要成分是 $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ 。它又可分为两种类型;第一种是红色氧化铁锈;第二种是红色氧化铁磨损颗粒。红色氧化铁锈即通常的铁锈,是 $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ 的多晶体,在白色反射光照射下呈桔黄色(图谱12-2-21)在白色反射偏振光的照射下呈桔红色(图谱12-2-22)。这种多晶团粒是顺磁性物质,所以在谱片全长范围内都可能发现这种大颗粒。它们产生于润滑系统含有水分的情况下;红色氧化铁磨损颗粒则是润滑不良时产生的平的薄片,在白色反射光下

呈灰色,在白色透射光下呈无光泽的红-棕色。由于它们对光的反射较强,在双色照明下很易与金属颗粒发生混淆。必须仔细辨认才可以看出它们不具有金属颗粒那样的颜色,在特别薄的部位还会从下面透过一些绿光。判别方法就是用白色透射光照明。图谱12-2-23为双色照明下的图像,红色氧化铁磨损颗粒与金属磨损颗粒很难区分。图谱12-2-24是同一视场在白色反射光和绿色透射光下的图像。图谱12-2-25是这些颗粒在白色透射光下显示出红褐色。这些扁平的氧化铁颗粒是磨损产生的。所以,当出现这些微粒出现时,无论是否有多晶体红色氧化物存在,均说明发生了润滑不良。

(2) 黑色氧化铁颗粒 与红色氧化铁相比,黑色氧化铁产生于润滑更不良的情况。黑色氧化铁是一种含 Fe_3O_4 , $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ 和 FeO 的混合物。油中混入水分时不产生黑色氧化物,而产生红色氧化物。

在高放大倍数下,黑色氧化铁颗粒呈粒状,并且有蓝色和桔红色的小斑点,看起来与巴氏合金氧化物相似。然而由于 Fe_3O_4 是铁磁性的,所以它们将顺磁场方向成链状沉淀。

(3) 暗黑色氧化物颗粒 这是严重氧化的铁磨损颗粒。它在白色反射光照明下呈无光泽的暗黑色,谱片加热时也不起变化。这些颗粒在生成期间曾受到高热,是严重缺乏润滑剂的结果。大块的暗黑色金属氧化物是表面剧烈磨损的明显标志。当细微的暗黑色金属氧化物与正常滑动磨损颗粒串在一起沉淀时,虽然还不表示危急失效,但也是将发生异常磨损的讯号。

图谱12-2-26显示一串正常滑动磨损颗粒和暗黑色金属氧化物。两类颗粒均以铁磁方式沉淀。暗黑色金属氧化物是暗灰色的,而游金属是正常磨损颗粒,所以是白色而有光泽。暗黑色金属氧化物颗粒在谱片热处理前已具有厚的氧化层,它们不受加热的影响。

4. 润滑油与腐蚀产物的识别

(1) 腐蚀磨损产物 腐蚀磨损产生许多细小的颗粒,其中大多数低于光学显微镜分辨率的下限,故称这种细粒物质为亚微颗粒。从腐蚀磨损油样制得的谱片具有一个不寻常的特性,即在 10mm 位置上的光密度读数(覆盖面积百分数)比 50mm 位置上的要高,所以谱片出口处细颗粒的大量沉淀是腐蚀磨损的明显特征。

图谱12-2-27为腐蚀磨损时谱片出口处大量沉积的细颗粒。将该沉淀物放在扫描电子显微镜上让X射线分析仪扫描,结果表明,其主要元素是铁、铝和铅。

(2) 摩擦聚合物颗粒这是润滑剂在摩擦副边界润滑条件下,由于摩擦所产生的高热而发生了聚合的产物。从外观上看,它们是一些大的、不定型的粘附体,其中总是嵌有许多金属颗粒。

油样中存在摩擦聚合物表明机器润滑有问题。如果润滑油的选用是合理的,摩擦聚合物就是在重载下产生的。对于某些场合,特别是重载齿轮箱(如直升飞机传动箱),摩擦聚合物的形成可以预报即将发生的划伤。过多摩擦聚合物的存在对机器状况是有害的,因为:①聚合物会使油的粘度增加;②摩擦聚合物可能迅速堵住滤油器,使油从旁路流过,油中大的污染物和磨损颗粒就会流到机器的工作零件上。

如在一台正常工作时不产生摩擦聚合物的机器的油样中发现了摩擦聚合物,就表明该机器发生了过载。图谱12-2-28显示出重载条件下钢对钢的磨损试验中产生的摩擦聚合物,严重磨损颗粒和切削磨损颗粒也同时出现,它们都是过载的征兆。双色照明是观察摩擦聚合物的最好方式,因为它突出了金属磨损颗粒(红色),又显示出基体的透明性(绿色)。

大多数摩擦聚合物对加热无反应,加热到铁颗粒鉴别的第一试验温度(330°C)不会使摩擦聚合物发生明显的变化,即使加热到480°C也只能使无定形摩擦聚合物基体部分挥发,而在这一温度下大多数有机物都已被破坏了。摩擦聚合物也不能用有机溶剂来溶解。所以,一旦摩擦聚合物在润滑系统中形成,它们便不容易清除。

(3) 二硫化钼颗粒 它们出现在谱片上时,很容易引起混淆,因为它们看起来与金属颗粒非常相似,而且具有类似的特性,故被认为是半金属化合物。其原因在于,虽然 MoS_2 是化合物,但其颗粒像金属颗粒一样能够遮光。然而,一旦学会如何鉴别 MoS_2 颗粒,这二者之间的差别便显而易见了。 MoS_2 作为润滑脂中的固体润滑添加剂,应用于高温和重载的场合。它是一种有效的固体润滑剂,因为它具有高的抗压强度,能够承受变载荷,但是由于它的剪切强度低,其颗粒显示出许多剪切面并具有直棱边。当谱片被加热到330°C时钢颗粒便变成

蓝色,而 MoS_2 颗粒仍未受影响(即使将谱片加热到最高热处理温度,它们也是如此),因此它们与铁磨损颗粒易于区别。

5. 污染物的识别

(1) 新油中的污染物 从油缸或油桶中取出的大多数清洁润滑油均含有不同数量的微粒物质。因此,铁谱分析中用作稀释油样的油必须经过仔细地过滤,采用大约 $0.4\mu\text{m}$ 孔径的滤油器过滤能够取得良好的效果。油中的污染物会引起的机器损坏,它主要取决于污染颗粒的硬度、大小及数量。当然,还取决于应用场合,例如精密轴承往往由于使用被污染的油而遭到破坏。所以许多机器在油箱和机器之间装有高效滤油器加以保护。在这种情况下,油中的颗粒可能仅仅引起油泵的磨损,因为这时油泵从油箱中抽油,通过滤油器再送至机器。只要颗粒的浓度不致大到堵住滤油器,使油从旁路流过,它们便起不了大的破坏作用。

(2) 新润滑脂中的污染物 使用润滑脂制作谱片时,必须用合适的溶剂例如甲苯和己烷的混合物来溶解润滑脂,才能从脂样中分离出颗粒。

润滑脂中大的磨损颗粒比润滑油中的同样颗粒更具有危险性,因为一旦使用了润滑脂之后,便无机会将污染颗粒去掉,而润滑油经过循环过滤却可以除掉污染物。

(3) 道路尘埃 将AC细试验粉末(即亚利桑那道路尘埃)弥散在油中然后制成谱片。亚利桑那试验尘埃被认为是轿车和越野车遇到的典型尘埃。它主要含二氧化硅(SiO_2),但也含有各种各样的其它物质。这种尘埃是通用汽车公司AC分析部在菲尼克斯实验室用当地获得的材料制作的。它按大小分类,出售给许多不同的实验室,用于各种各样的试验,其中包括过滤器效率试验、磨损试验以及尘雾测量试验。观察道路尘埃的铁谱片,发现在进口处有一些深色金属氧化物颗粒,但它们仅仅是全部颗粒中的一小部分,确切地说少于1%。还发现了红色氧化物(Fe_2O_3)颗粒。

(4) 煤尘 它是各种化合物的混合物,煤本身相当软,它可能不会引起被润滑的零件太大的损伤,但煤尘中含有的 SiO_2 却是坚硬的磨料。煤尘还含有其它物质,像石灰岩,铁的氧化物及其它矿物。这些颗粒具有较大的潜在损伤作用。所以在煤尘和其它工业环境(如矿山、选矿、水泥生产、采石等)中工作的机械,应当防止污染物进入润滑油

统。甲醇和乙醇是煤尘的良好溶剂，将合适的溶剂加入已知量的油样中，在超声波中使混合物振荡，便可溶解不需要的颗粒。

(5) 石棉 石棉纤维能与其它常见的、像用于过滤器的那些纤维区别开来。因为它们的尺寸非常小，而且它们有可能被破碎或劈开生成更细小的纤维。即使在1000倍下观察石棉，在那些处在显微镜的分辨率下限的较大的纤维上仍然存在单个的纤维和碎片。石棉是几种矿物纤维的通称。

油样中的石棉屑，可能是来自制动器或离合器片、绝缘材料或特殊滤油器以及空气中的尘埃。

(6) 其他污染物 空气中的污染物、过滤器和密封件碎屑等也常在油中发现，可能会干扰谱片的动作和润滑系统的清洁度。常见的污染有空气中位铸铁粉末（切削时散逸在空气中）、滤芯的纸或纤维屑、或密封件中的碳或石墨屑等，在鉴定时应注意识别。

(四) 铁谱读数与数据处理

1. 铁谱读数

应用铁谱分析监测机器的润滑磨损工况可以先根据铁谱读数进行磨损趋势分析，然后再根据磨损颗粒的类型判别机器的磨损状态。直读式与分析式铁谱仪的读数有：

(1) 直读铁谱读数 D_1 和 D_2 分别代表油样中所含大于 $5\mu\text{m}$ 和小于 $2\mu\text{m}$ 的磨损颗粒的相对量，其单位是DR单位。仪器的读数范围是 $0\sim 190\text{DR}$ 单位，即当沉淀器管的底部完全被磨损颗粒覆盖时就达到满刻度190。

(2) 分析铁谱读数 A_1 和 A_2 这是装在铁谱仪显微镜上的光密度计在谱片上两个位置读得的读数，它们代表在 1.2mm 直径的视场中被磨损颗粒所覆盖的面积百分数； A_1 是在靠近液体入口点（大约即谱片出口端 55mm ）的最大覆盖面积读数， A_2 是在距谱片出口端 90mm 处的最大覆盖面积读数。这两个位置相应于直读铁谱中读数 D_1 和 D_2 所处的位置。 A_1 和 A_2 读数的范围是 $0\sim 100$ 。

直读铁谱与分析铁谱两种读数是等价的，但是，在数值上却是不能互相换算的。这是因为铁谱技术的读数取决于液体介质中磨损颗粒沉降出的大小颗粒的排列。磨损颗粒沉降时的运动方程是颗粒尺寸、形状、磁化率、比重及油液的粘度、密度、流动速度的复杂函数，对于形状和磁化率相同的颗

粒来说，其下沉速度近似地和它的尺寸的平方成正比，因而，颗粒随流体所流过的距离将与它的尺寸和进入磁场时它在流体层中的高度与流动速度有关。就一定大小的颗粒来说，它有一个可能达到的最大流动距离，在直读铁谱中，大于 $5\mu\text{m}$ 的粒子在管中流动的距离不大于 1mm ，因此，沉淀器管中每一点实际上都被大小不同的粒子所覆盖，但每一点都有一个该点可能沉淀的最大颗粒尺寸。这样，沉淀器管中磨损颗粒的排列可以用图12-2-12表示。在分析铁谱中谱片上颗粒的沉淀也以类似的方式发生，但由于分析铁谱中磁场强度和梯度与直读铁谱有所不同，谱片上所有大于 $5\mu\text{m}$ 的颗粒将沉淀在入口处，而大多数 $1\sim 2\mu\text{m}$ 的颗粒则沉淀在 $0\sim 50\text{mm}$ 之间。同样，它也不能阻止小颗粒的早期沉淀而只是由于大颗粒有较高的沉淀速度，这导致在每个谱片上的某一点之前，一给定尺寸的所有颗粒都已沉淀下来。粒子尺寸越大，与该粒子相对立的点将越靠近入口区，但这些点的位置也同时受到流体的粘度、局部磁场的变化、粒子形态和颗粒的磁化率等因素的影响，因此， A_1 和 A_2 读数和 D_1 和 D_2 读数由于各自条件不同而在数值上不能互相换算。

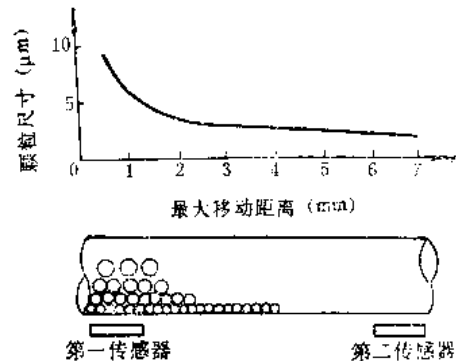


图12-2-12 直读铁谱仪沉淀器管中磨损颗粒的排列

2. 磨损烈度指数

在正常的润滑工况下零件表面缓和的磨损过程中所产生的磨损颗粒的最大尺寸一般都在 $15\mu\text{m}$ 以下，其中绝大多数是 $2\mu\text{m}$ 或更小些，而任何一个不正常润滑工况下所产生的磨损，即任何一种能大大降低摩擦副使用寿命的磨损方式（如严重滑动磨损、疲劳、擦伤等等）所产生的磨损颗粒，除了数量大大增多之外，其最大尺寸大多数大于 $15\mu\text{m}$ ，所以磨损过程的第一特征是其磨损颗粒的最大尺寸与磨损方式有关，这一点显然可作为对磨损情况进行定量

的第一个基准。考虑到这一情况，正常磨损工况的铁谱定量读数 A_i 或 D_i 值应该接近 A_s 或 D_s 值（实际上正常磨损时的 A_i 值或 D_i 值往往稍大于 A_s 或 D_s 值）。而在大多数不正常的润滑磨损工况下， A_i 及 D_i 值会大大地超过 A_s 和 D_s 值。因此，数值 $A_i - A_s$ 或 $D_i - D_s$ 可作为发生不正常磨损的一个标识，即 $A_i - A_s$ （或 $D_i - D_s$ ）可以作为用铁谱技术定量磨损过程的第一个指标。

其次，从铁谱技术读数测定的结果中还发现不正常磨损时，磨损颗粒的总数大大增加（只有疲劳磨损的初始阶段例外）。磨损颗粒的总数可以用 $D_i + D_s$ 或 $A_i + A_s$ 表示，因此，这个参数可以作为发生不正常磨损的第二个指标。

综合以上所述，把上述两个指标相乘，即以 $D_i + D_s$ 或 $A_i + A_s$ （代表颗粒总数）和 $D_i - D_s$ 或 $A_i - A_s$ （代表大颗粒数量）的乘积作为反映磨损激烈开始的敏感性指标，以符号 S_A 标记，称为“磨损烈度指数”（Severity of Wear Index）。以直读铁谱读数为基础的标记为 S_D ，以分析铁谱读数为基础的标记为 S_A 。

$$S_A = (A_i + A_s)(A_i - A_s) = A_i^2 - A_s^2$$

$$S_D = (D_i + D_s)(D_i - D_s) = D_i^2 - D_s^2$$

S_A 和 S_D 统称为 I 。

由于不同的机器润滑系统在颗粒数量和尺寸分布上的变化很大，因此必须对所监测的对象测定其正常运转时的 I 数值范围。如果以后的测定值超出了这个范围，就可以作出系统出现不正常磨损的预报。

一般，也可以对监测系统使用两个参数，即以 $A_i + A_s$ （或 $D_i + D_s$ ）作为磨损的一般水平的指示值，而用 S_A （或 S_D ）作为磨损剧烈程度的指示值。这样，对于某些“非灾难性”然而也是过度磨损的情况（例如过度的正常摩擦磨损、某些类型的氧化磨损以及磨料磨损），可以利用 $A_i + A_s$ （或 $D_i + D_s$ ）检测出来，而磨损烈度指数 S_A 或 S_D 则作为很快会失效的剧烈磨损开始的指示。

3. 累积总磨损值与累积磨损烈度曲线

在正常的缓和的磨损情况下，系统的磨损将处于稳定状态，磨损率相对恒定，也即磨损颗粒的产生速率也相对恒定，机器润滑系统中磨损颗粒的浓度也相对稳定。因此，若将代表磨损颗粒总量的参数 $(D_i + D_s)$ 或 $(A_i + A_s)$ 定义为总磨损值，则对润滑系统每次取样测出的总磨损值累积叠加称之为累积

总磨损值 $\Sigma(D_i + D_s)$ [或 $\Sigma(A_i + A_s)$]，在坐标图上取等距离标出每次取样的累积总磨损值并连成线，则这条累积总磨损值线将近似为一条斜率恒定的斜线。同理，若将代表大、小颗粒读数之差 $(D_i - D_s)$ 或 $(A_i - A_s)$ 定义为磨损烈度，同样将每次取样测量得到的磨损烈度值累加称为累积磨损烈度，则相应地也可画出累积磨损烈度线，这条线也是一条斜率近于恒定的斜线。机器在正常、缓和的磨损情况下，上述两条线（累积总磨损值线和累积磨损烈度线）将构成两条发散的斜线（见图12-2-13）。

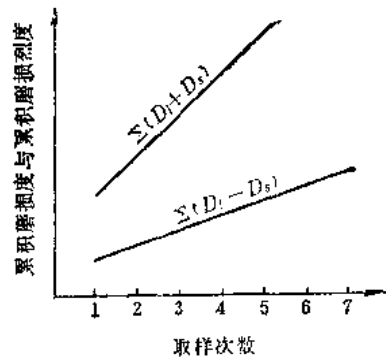


图12-2-13 正常磨损情况下的累积磨损值线与累积磨损烈度线

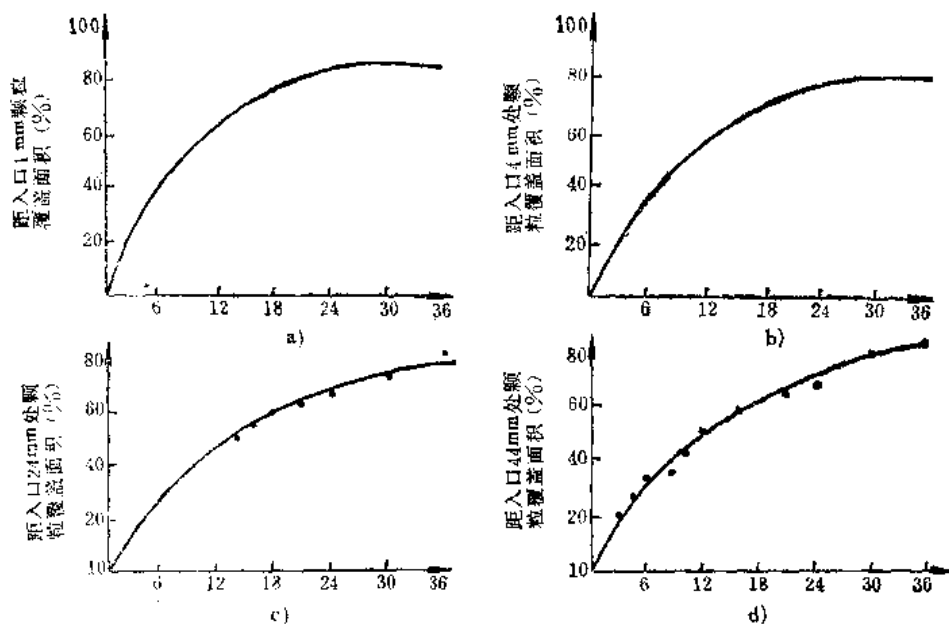
当系统发生不正常磨损时，无论大颗粒或小颗粒的产生速率都会发生变化，因此，累积总磨损值与累积磨损烈度线的斜率都将发生变化。如果大颗粒数量的增长速度高于小颗粒，则两条曲线将互相靠拢。相反，则两条曲线均同时向上拐但进一步发散。上述两种情况均可作为磨损趋势加剧的征兆。

4. 曲线下面积

谱片上磨损颗粒覆盖面积 (AUC) A_i 和 A_s 只反映了谱片上两个具有代表性位置上的磨损颗粒密度。由于谱片上颗粒的沉降带有很大的随机性，沉降过程中影响因素也很多，测定覆盖面积往往误差比较大，加上有些类型的磨损（例如腐蚀磨损）会产生大量的小于 $1\mu\text{m}$ 的颗粒。这些颗粒集中沉淀在谱片出口处， A_i 和 A_s 均反映不出这种磨损颗粒数量和尺寸的变化，对于类似这样的情况，如采用在谱片全长上测量覆盖面积并画出谱片位置-覆盖面积曲线则更能反映系统中磨损情况的变化。这种用来衡量磨损严重程度的参数叫做曲线下面积。

5. 标准化读数

铁谱技术中的定量读数都是采用测定光密度的方法来测量磨损颗粒的量，因此，当磨损颗粒互相



横坐标表示用于制备谱片的样品体积(mL)

图12-2-14 谱片上颗粒重叠对线性响应的影响

重叠时，测出的光密度与颗粒数量之间将偏离线性关系。重叠越严重，偏离得越厉害。所以，进行铁谱分析时，往往要对采集来的原始油样进行稀释以减少颗粒量，这样，进行磨损趋势分析时应该把测定结果换算成原始油样的读数，这就是“标准化读数”。

6. 铁谱读数误差的分析

铁谱仪读数能否与润滑油中磨损颗粒的数量相关可从下列三个方面进行考察，即定量读数与磨损颗粒数量之间的线性响应、磨损颗粒的沉积效率和读数的重复性。

(1) 铁谱读数的线性响应 影响线性响应的的原因是磨损颗粒的重叠。颗粒如果发生重叠，则磨损颗粒的数量和它的遮光量之间的关系不成线性。当磨损颗粒的浓度极低时，由于磁场有防止重叠的作用，颗粒排成长链而不至堆叠起来。实验表明，当覆盖面积在50%以下时，由重叠所引起的非线性基本上可以排除。图12-2-14示出粒子重叠对线性的影响。在直读铁谱中，读数在50以下的重叠造成的影响很小。当 D_r 读数达到100时，由重叠引起的误差大约为10%， D_r 读数在100时，这个误差则为6%。图12-2-15为直读铁谱的线性响应曲线。

(2) 沉积效率 油样中的磨损颗粒通过铁谱仪时能沉降下来的百分比称为沉积效率。分析铁谱

的沉积效率为：油样第一次通过谱片时能沉淀80%的大于 $2\mu\text{m}$ 的颗粒和50%的 $0.1\mu\text{m}$ 的颗粒。表12-2-6所列为分析铁谱的沉积效率。

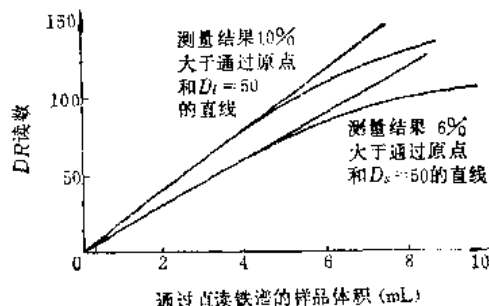


图12-2-15 直读铁谱读数的线性响应

表12-2-6 分析铁谱的沉积效率

距谱片进口端距离 (mm)	第一次制备谱片的覆盖面积	第二次制备谱片能覆盖面积	沉积效率
4	46	8	83
14	42	7	83
24	31	8	71
34	27	12	50
44	25	12	22

油样中的有机杂质对沉积效率有很大影响，它能使沉积效率下降并扰乱粒子在谱片上的分布。通常，大于1 μm 的颗粒都能沉积下来，但当油中存在大量有机物时，第二次通过谱片时仍能看到1 μm 的颗粒。另外，4 μm 的大颗粒也可能在谱片出口端看到。表12-2-7所列为有机物对沉积效率的影响。

表12-2-8所列为直读铁谱的沉积效率。从表中可见，第一次通过以后， D_1 减少了86%， D_2 减少了66%，第一次通过时 D_1 和 D_2 值较接近。

(3) 重复性 铁谱定量数据重复性比较差，这与磨损颗粒沉降过程的随机性有很大关系。表12-2-9是按同一方式从同一油样制出的3个谱片上不同位置处测得的覆盖面积百分比，显然读数有很

大变化。对于覆盖面积大于10%的，其变化幅度介于5%~38%之间，大部分在10%~20%之间。

直读铁谱的重复性列于表12-2-10。从该表可见，直读铁谱 D_1 读数的标准偏差系数为6%，而 D_2 读数的标准偏差系数为25%。

上述数据表明，铁谱技术定量读数的重复性很差。其误差来源之一是仪器，例如分析铁谱中液体流动速度不恒定，油进入谱片的位置不能精确定位，直读铁谱管子内径有变化等。另一个误差来源是首先沉积下来的大颗粒对局部磁场会有很大影响，并能改变基片上粒子的分布，使颗粒沉积过程带有很大的随机性，因而造成铁谱数据的重复性差，这是目前铁谱仪存在尚需改进的地方之一。

表12-2-7 有机物对沉积效率的影响

距谱片进口端的距离 (mm)	所制备谱片上颗粒的尺寸分布 (μm)			备 注
	第一次沉积	第二次沉积	第三次沉积	
4	70% ≥ 5	没 粒 子	没 粒 子	油中没有有机物
24	全部 ≤ 2	没 粒 子	没 粒 子	
34	全部 ≤ 1	小量 < 1	没 粒 子	
4	10% ≥ 3	95% ≤ 3	全部 ≤ 1	油中有大量有机物
24	全部 ≤ 2	全部 ≤ 1.5	全部 ≤ 1	
34	全部 ≤ 1	大多数 ≤ 2 少量 4~5	全部 ≤ 1	

表12-2-8 直读铁谱的沉积效率

读 数	通过直读铁谱次数			第二次读数比第一次 减少百分数	第三次读数比第二次 减少百分数
	1	2	3		
D_1	93	11	8	88	27
D_2	33	10	8	70	20
$D_1 - D_2$	60	1	0	98	100

表12-2-9 分析铁谱的重复性

谱片	P_0	\bar{X}	σ/\bar{X}	P_4	\bar{X}	σ/\bar{X}	P_{14}	\bar{X}	σ/\bar{X}	P_{24}	\bar{X}	σ/\bar{X}	P_{34}	\bar{X}	σ/\bar{X}
1	30	29	0.14	20	21	0.31	12	12	0.08	9	9	0.06	7	8	0.15
	33			28			12			10			9		
	25			15			11			9			8		
2	45	52	0.14	31	36	0.14	19	26	0.19	10	18	0.36	31	17	0.27
	60			41			28			22			20		
	51			36			26			22			18		
3	36	29	0.65	29	28	0.18	22	23	0.18	16	20	0.20	17	19	0.11
	39			22			19			21			19		
	40			32			29			24			21		

表12-2-10 直读铁谱读数的重复性

试 验 号	D_1	D_2
1	57.6	18.0
2	58.4	17.8
3	64.8	18.5
4	57.7	19.8
5	72.8	18.0
6	60.0	17.5
7	72.2	18.2
8	46.8	18.5
9	58.0	16.8
10	48.0	17.0
11	56.7	17.2
12	61.6	17.0
13	45.8	16.0
14	63.2	19.2
15	73.7	18.5
16	61.7	18.8
18	56.2	18.1
19	65.4	14.6
20	60.3	16.9
均 值	58.1	17.5
标准偏差	8.9	1.04
标准偏差系数	15%	6%

(五) 磨损趋势分析与润滑磨损工况的监测

一个机械润滑系统的磨损过程通常将经历跑合、正常磨损、严重磨损的发生与发展，直至灾难性失效等几个阶段。润滑系统中的磨损颗粒的数量（浓度）和尺寸分布将随该系统所处的阶段而发生变化，这一变化过程通过铁谱仪读数 D_1 、 D_2 或 A_1 、 A_2 所作出的各种曲线而反映出来。监测者可从分析铁谱数据曲线来监视机械的润滑磨损工况，预测机械元件的磨损趋势，从而及时采取必要的措施。

这就是机械润滑系统的铁谱监控。表12-2-11为一般的机械润滑系统在不同磨损阶段磨损颗粒的特征。

一个理想的机器状态监测与磨损分析，应能够根据磨损颗粒的数量与尺寸分布有效地揭示机器磨损过程的变化，同时应能获得有关颗粒形态和成分的数据，以进一步提供机器的润滑和磨损工况以及磨损产物来源的信息。

1. 铁谱监测与光谱监测曲线的基本区别

对同一台机器，用光谱和铁谱分析法所得到的数据曲线之间有一个根本的区别。图12-2-16是同一台机器从跑合到正常磨损然后到非正常磨损的整个历程中铁谱和光谱数据的变化曲线。光谱数据在整个历程中将连续递增，而铁谱数据呈现所谓“浴盆”形。在正常磨损阶段，光谱数据呈线性增大，

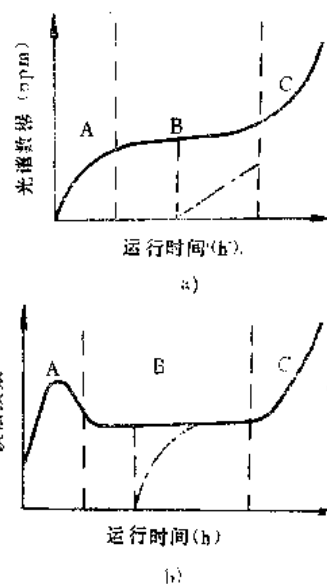


图12-2-16 铁谱数据与光谱数据之间的差异

A—磨合阶段 B—正常磨损阶段
C—不正常磨损阶段 ————换油

表12-2-11 不同磨损阶段的颗粒特征

序号	磨损阶段	磨 损 颗 粒 特 征
1	跑合阶段	薄片状和长条状摩擦磨损颗粒，伴随有少量其他类型的磨损颗粒（尺寸在 $5 \sim 10 \mu\text{m}$ 之间）
2	正常磨损阶段	与磨损机理有关的正常摩擦磨损颗粒或其他类型的正常磨损颗粒，尺寸一般不超过 $5 \mu\text{m}$
3	严重磨损的起始	开始出现与磨损失效形式有关的不正常磨损颗粒，如较大尺寸的切削屑，摩擦碎片屑以及严重滑动磨损等。颗粒尺寸可大于 $5 \sim 10 \mu\text{m}$
4	严重磨损的发展	大量的不正常磨损颗粒，其形态取决于磨损机理，颗粒尺寸一般不小于 $10 \mu\text{m}$
5	灾难性破坏	颗粒尺寸可达 1mm ，表面有失效特征

而铁谱数据将保持稳定值。图中的点划线是换油时读数的变化。铁谱读数从平衡值下跌然后逐渐恢复到平衡值，而光谱读数将重新由零开始逐渐增大并画出一条新的斜线。这是因为铁谱读数反映的是系统磨损颗粒的产生速率，而光谱读数则反映系统中磨损累计值。表面看来，光谱曲线与人们所熟知的磨损曲线相符，然而，铁谱读数的“浴盆”形曲线却正是铁谱监测的基本依据。下面将通过润滑系统中磨损颗粒平衡浓度的推导阐述铁谱“浴盆”形监测基础线的基本依据。

2. 润滑系统中磨损颗粒的平衡浓度

任何一个正常运转的机器，其润滑系统中磨屑的浓度将会达到一个稳定的动平衡状态，这是定量铁谱监测机器磨损状态的基本依据。机器润滑系统中磨损浓度趋向平衡的原因是磨损颗粒的损耗。系统中磨损颗粒损耗的途径有：

- 1) 过滤；
- 2) 沉降；
- 3) 碰撞和粘附到固体表面；
- 4) 细分（研磨）；
- 5) 氧化或侵蚀；
- 6) 泄漏；
- 7) 其它（如电磁场引起的分离）。

上述损耗途径中损耗速率均与油中颗粒的浓度、尺寸、密度（比重）和形状有关。颗粒的产生率与损耗率决定其平衡浓度的高低和达到平衡所需的时间。磨损颗粒的产生速率取决于机器的磨损状态，因此，在某一种磨损状态下，油中某种磨损颗粒的平衡浓度和达到平衡的时间（甚至能否达到平衡）将取决于其磨损率。

3. 平衡浓度的数学模型

润滑系统中各种磨损颗粒的平衡浓度取决于其产生率与损耗率，而这两个速率显然还与颗粒的尺寸、形状和密度有关。假设油中磨损颗粒均匀分布，另外，不考虑油的泄漏这一偶然因素，对于某一种尺寸为 i ，形状和密度近似相同的磨损颗粒，假设它在润滑系统每一个循环中产生的颗粒数为 x ，并设其损耗率为 a_i 。这种颗粒在第一个循环后的浓度为 $N(a_i, 1)$

$$\text{则 } N(a_i, 1) = x \quad (12-2-1)$$

那么，润滑系统第二个循环后的浓度为

$$N(a_i, 2) = x + x(1 - a_i) \quad (12-2-2)$$

第三个循环后的浓度为

$$N(a_i, 3) = x + x(1 - a_i) + x(1 - a_i)^2 \quad (12-2-3)$$

n 个循环后的浓度为

$$\begin{aligned} N(a_i, n) &= x + x(1 - a_i) + \dots + (1 - a_i)^{n-1} \\ &= x [1 + (1 - a_i) + \dots + (1 - a_i)^{n-1}] \\ &= x \sum_{r=1}^n (1 - a_i)^{r-1} \quad (12-2-4) \end{aligned}$$

由数学推导可得

$$\begin{aligned} \sum_{r=1}^n (1 - a_i)^{r-1} &= \frac{1 - (1 - a_i)^n}{1 - (1 - a_i)} \\ &= \frac{1 - (1 - a_i)^n}{a_i} \quad (12-2-5) \end{aligned}$$

将式12-2-3代入式12-2-4得

$$N(a_i, n) = x \frac{1 - (1 - a_i)^n}{a_i} \quad (12-2-6)$$

在平衡状态 $n \rightarrow \infty$, $(1 - a_i)^n \rightarrow 0$

$$N(a_i, \infty) = x \frac{1}{a_i} \quad (12-2-7)$$

由此得颗粒的平衡浓度与产生率成正比，与该颗粒的损耗成反比。

式12-2-7可用于计算颗粒的平衡浓度，例如 $x = 500$ 颗/循环毫升时， $a_i = 40\% = 0.4$ 。

4. 达到平衡所需的循环次数

系统中被监测的磨损颗粒是否已达到平衡浓度（或能否达到平衡），是能否进行监测的依据。为此，引入 β 值表示经过 R 次循环后系统接近平衡浓度的程度

$$\frac{N(a_i, R)}{N(a_i, \infty)} = 1 - \beta \quad (12-2-8)$$

式中 $\beta \ll 1$ 。例如 $\beta = 0.01$ ，则表示系统经 R 次循环后，颗粒浓度达到平衡浓度的 $1 - \beta = (1 - 0.01) = 99\%$ 。为了得到有代表性的油样，这个浓度与平衡浓度已非常接近。

对于某一系统来说，确定了某种颗粒的 a_i 和 β 值，即可用式12-2-7和式12-2-8求出监测时所要知道的 R 值

$$\frac{x \left[\frac{1 - (1 - a_i)^R}{a_i} \right]}{x \frac{1}{a_i}} > 1 - \beta \quad (12-2-9)$$

$$\text{即 } 1 - (1 - a_i)^R > 1 - \beta$$

$$(1 - a_i)^R < \beta$$

表12-2-12 $x = 1$ 时的 $N(a_i, n)$ 值①

n	a_i				
	0.8	0.1	0.05	0.01	0.001
2	1.2	1.9	1.95	1.99	1.999
5	1.2496	4.095	4.524	4.901	4.999
100	1.25	9.9997	19.89	63.49	95.21
∞	1.25	10.0	20.0	100.0	1000.0
$\beta = 0.01$ 的循环次数 R ②	3	1.24			
	44		9.903		
	90			19.302	
	450				99.007
	4603				

① 本表取自参考文献；

② 颗粒浓度达到平衡浓度99%时的循环次数。

$$R \ln(1 - a_i) < \ln \beta$$

$$R > \frac{\ln \beta}{\ln(1 - a_i)}$$

式中 R —— 为使方程 (12-2-9) 成立之最小整数。

表12-2-12为按方程式12-2-8和12-2-9计算在不同循环次数 n 和损耗率 a 的系统中的颗粒浓度 N 值。表下部为颗粒浓度达到平衡浓度99% ($\beta = 0.01$) 时的循环次数 R 。由此可见, 当 a 值较小时, n 值收敛性差。表中的 R 值可用于确定一个机器需运行多少时间才能取到有代表性的油样。此外, 颗粒尺寸越小, 则沉降及过滤等损耗率也越小, 达到平衡的时间则越长; 而较大的颗粒则 a_i 值比较大, 可以很快达到平衡状态。

5. 铁谱监测基础线

光谱分析所测量的是油中从分子大小到仍可激发的最大颗粒的全部金属含量。而如前所述, 细小的颗粒损耗率很低, 对于尺寸接近分子的颗粒, 其损耗率几乎为零, 因此, 它们对于光谱读数的作用将随时间而增大直到换油为止。所以, 图12-2-16 a 中的光谱曲线 B 随时间递增并与总磨损量相对应, 一旦换油, 其值将重新由零开始上升。

铁谱测定的磨损颗粒尺寸一般由 $0.1 \mu\text{m}$ 至几十 μm , 因此, 其损耗率较大, 颗粒浓度可在一定时间内达到平衡。所以, 正常状态下铁谱读数将保持在某一平衡值, 因而可以根据实际测定建立起正常状态的平衡值, 并确定安全操作的极限值作为基础线。当磨损状态发生异常时, 平衡浓度升高并超过基础线, 从而可以提出预报。

6. 铁谱监测与诊断的一般程序

铁谱状态监测与诊断的一般程序如下:

1) 与有关操作、维修、管理人员协商, 征询意见并对铁谱技术作必要的讲解。

2) 了解下述基本资料:

- ① 有关机器的结构、性能及运转历史;
- ② 有关机器润滑系统的结构与技术条件;
- ③ 有关机器的操作、维护、与修理规范;
- ④ 油品型号、使用时间与换油期等;
- ⑤ 过滤器技术条件;
- ⑥ 摩擦副材料、表面处理与技术要求等;
- ⑦ 有关机器的原维修历史与有关报告。

3) 确定取样程序。根据取样方法的要求确定适合有关机器的取样周期, 并从机器润滑系统中取出有代表性的油样。

4) 油样处理。根据所取油样的颗粒浓度及污染情况, 选择合适的稀释比例与直读铁谱测定方法。同时要注意油样的加热与摇晃均匀。

5) 磨损趋势分析。选择适当的定量铁谱参数, 作出其随时间的变化曲线, 并进行磨损趋势分析。

6) 磨损颗粒观察。制备谱片, 仔细观察谱片上磨损颗粒的形态、尺寸、数量、成分等, 确认磨损特征。

7) 调整取样周期。当确认机器开始出现不正常磨损时, 应缩短取样周期, 加强监测。若确认机器仍处于稳定的正常磨损阶段而原取样间隔过短时, 可适当延长取样周期。

8) 建立监测基础线。经过不同状态下的大量

监测实践后建立起所监测机器在不同磨损状态下的颗粒特征与定量铁谱水平, 以此作为状态预报的基础。

应当指出的是, 本程序仅能作为应用铁谱技术监测任何机器设备的参考, 监测者应视不同的监测对象与目的而灵活使用。此外, 在可能情况下, 监测人员应充分利用拆检, 检查零件磨损情况, 以校验和改进铁谱诊断结果。

第3节 铁谱监测应用实例

(一) 柴油机监测与诊断

柴油机工业是对铁谱诊断技术最感兴趣的部门之一, 这主要是由于其特别重要的地位所决定的。柴油机位于交通与能源两个部门的交叉口, 开展柴油机的状态监测与故障诊断, 对于提高我国交通运输能力, 减低能源消耗, 具有重要的意义。

1. 柴油机润滑油中主要磨损颗粒及其来源

柴油机油的铁谱分析可以提供柴油孔磨损状态的重要信息, 它主要包括三个方面:

1) 将磨损颗粒数量(定量铁谱数值)和尺寸与正常状态下的基准值相比较, 便发现异常磨损。

2) 通过分析磨损颗粒形态可以判断磨损类型, 如严重滑动磨损, 润滑不良引起的磨损以及磨料磨损等。

3) 加热谱片可以确定颗粒成分, 从而判断磨损颗粒的来源。对于柴油机, 加热谱片主要是为了区分低合金钢和铸铁。一般来说, 低合金钢颗粒来自曲轴, 而铸铁颗粒则来自活塞环与气缸摩擦副。

然而, 由于柴油机中摩擦副较多, 影响因素复杂, 要想准确判断颗粒来源, 必须对柴油机中各种摩擦副材料十分熟悉。柴油机的主要摩擦副及其材料列于表12-3-1。而尤其应当指出的是, 光谱油分析结果对于判断何种摩擦副的磨损是极为重要的。

2. 柴油机磨合研究的铁谱监测

铁谱技术应用于柴油机磨合特性研究是基于, 磨合初期由于粗糙表面的磨损, 润滑油中颗粒数量将急剧增加至一最大值, 不正常磨损颗粒尺寸也相应增大, 此为剧烈磨合阶段。随着摩擦副磨损速率逐渐降低, 颗粒尺寸也逐渐减小。当颗粒浓度水平与尺寸水平接近正常磨损水平时, 磨合即基本结束。直读铁谱和分析铁谱技术能有效地用于显示柴

表12-3-1 柴油的主要摩擦副及其材料

序号	摩擦副名称	摩擦副材料
1	气缸套	铸铁
2	活塞环	铸铁
3	活塞	铝、铝合金、可锻铸铁、锡-铅镀层
4	曲轴	低碳合金钢
5	主轴颈和小端轴颈	Pb-Sn、Cu-Pb-Sn、In、Al-Si、Al-Si、Cd
6	止推轴承	磷青铜、Al-Sn、Cu-Pb
7	凸轮轴	铸铁
8	气门组件	合金钢
9	辅助驱动装置	磷青铜、低碳合金钢

油机润滑油中颗粒浓度与尺寸的变化, 因而能成功地应用于柴油机跑合特性研究。图12-3-1是Z12V-190B柴油机跑合阶段的直读铁谱磨损趋势曲线。工厂原来规定, 跑合时间是330min。直读铁谱结果表明, 至B时跑合已基本结束。磨损颗粒观察(图谱⊙12-3-1和图谱12-3-2)也表明, 运转180min油样中主要已是正常磨损颗粒了。因此, 铁谱分析结果表明, 原来的柴油机出厂跑合时间过长, 可以将其缩短为3h, 从而节省能源。

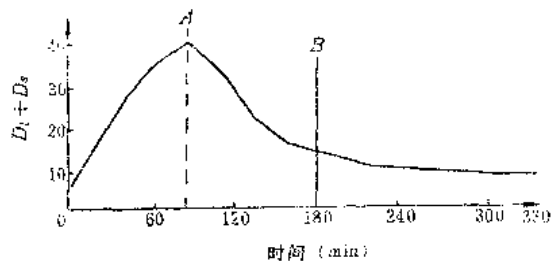


图12-3-1 Z12V190B柴油机跑合期的直读铁谱磨损趋势曲线

3. 柴油机“拉缸”故障的诊断

图12-3-2是采用直读和分析铁谱磨损烈度指数 I_1 绘出的柴油机磨损趋势曲线。在7月之前, 磨损处于稳定状态, 7~9月, I_1 值迅速增加, 显示了发动机紧急失效的预兆。对80.7样品进行谱片颗粒检测, 发现有大量的严重磨损颗粒以及过量的铜合金磨屑。采用谱片加热法区分颗粒, 发现在铁磁性金属颗粒中主要是铸铁, 来自气缸和活塞环。铜屑

⊙ 图例均附于本书之后——编者注。

表12-3-2 腐蚀磨损时谱片上
10mm处的颗粒覆盖面积

样品序号	稀释比	10mm处颗粒覆盖面积 (%)
新油	1:1	0.7
1	10:1	5.7
2	100:1	13.0
3	100:1	46.4
4	100:1	39.5
5	100:1	57.8

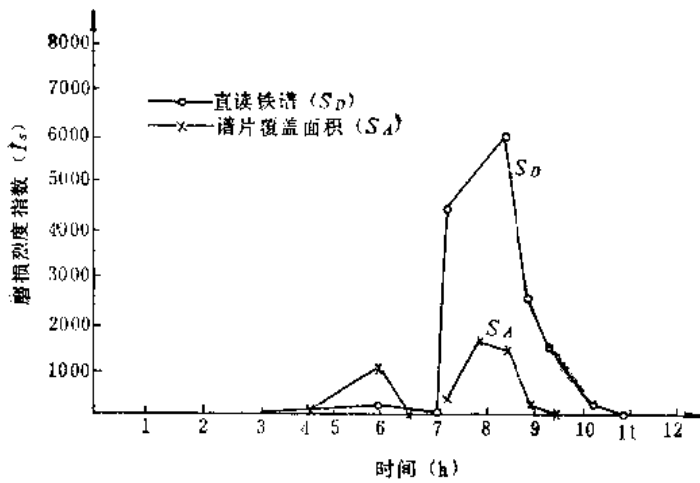


图12-3-2 某柴油机柴油机的 I_s 曲线

则可能来自轴承或黄铜止推垫圈。谱片分析结果加强了直读磨损趋势分析的初步判断。

9月,经噪声和振动检测后,柴油机应予维修,于是送进船坞拆卸,发现活塞环和气缸套被擦伤,而黄铜止推垫圈出现过热且尺寸已大大磨小,检测结果与实验室铁谱分析结果是一致的。

4. 柴油机腐蚀磨损的诊断

腐蚀磨损是柴油机气缸磨损的一个重要原因。腐蚀起因于燃烧过程中产生的废气与燃油中的硫形成的硫酸。在使用高硫燃油的中速柴油机中,这一点尤其重要。发动机生产厂家认为,如果燃料中硫的含量从0.5%增加到1%,腐蚀磨损会增加4倍。润滑油中加入碱性添加剂可以中和酸。发动机在工作时,碱性添加剂会不断与酸中和而消耗。当消耗完了以后,发动机就会受到带腐蚀性的酸的侵蚀,从而导致严重的腐蚀磨损。这种磨损发生在活塞环与气缸壁上,有时轴承中的铅也发生这种磨损。

柴油机发生腐蚀磨损时,直读铁谱读数将大大高于正常值。但由于缺少大颗粒,因此, $D_i: D_s \approx 1$ 。

对模拟腐蚀条件进行的发动机试验表明(表12-3-2),发生腐蚀磨损时,谱片上沉积的颗粒将显著高于正常状态。随着试验不断进行,谱片出口处沉积有越来越多的亚微米级的小颗粒。测量10mm处的颗粒覆盖面积,可清楚地看出腐蚀磨损的发展趋势。

(二) 齿轮磨损状态的监测

齿轮广泛应用于各种机械装备。近几年来已有不少关于应用铁谱技术对齿轮系统进行磨损状态监测的成功报导。

1. 齿轮系统的失效方式与速度、载荷的关系

发生在齿轮滚-滑区域的磨损主要有两类:①节线区域的相对运动是滚动,产生的颗粒与滚动接触疲劳颗粒类似;②在齿根或齿顶附近,滑动接触比例增大,生成的颗粒具有滑动磨损特征,如颗粒表面有条纹,表面积与厚度之比较大(图12-3-3)。

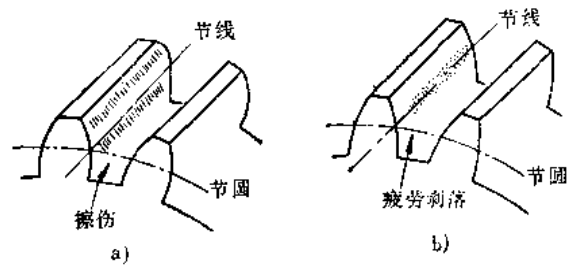


图12-3-3 齿轮失效的情况

图12-3-4给出了齿轮系统的失效方式与运转速度、载荷的关系。载荷较大而速度过低时,齿轮磨损是由于齿轮接触面间润滑油膜的破裂。这时提高速度,可使油膜承载时间缩短,从而可承受较高的负荷。最左边的曲线给出了重载和低速的极限。载

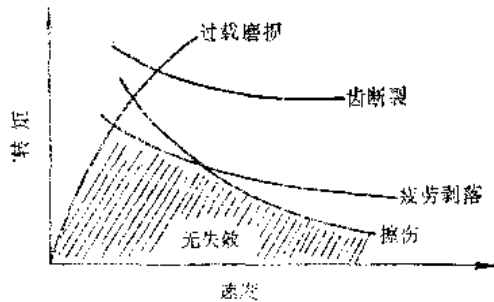


图12-3-4 齿轮的失效与速度、转矩的关系

荷过大时，齿节部分会出现疲劳磨损。如继续增加载荷，则传递载荷将穿透油膜，齿轮会迅速破坏。影响磨损的主要因素是材料强度和负载，而与润滑剂的选择无关。图中的疲劳剥落曲线取决于齿轮表面强度。速度过高时，会使齿轮间的润滑油膜破裂和过热，从而导致齿轮擦伤和胶合，产生的颗粒具有氧化过热特征，表面有滑动的痕迹。

2. 齿轮系统的铁谱诊断的典型实例

(1) 齿轮的过载 分析油样来自某化学处理厂搅拌机驱动齿轮减速机。采用双色照明观察谱片入口处，发现有大量反射红光的大磨粒。显然，齿轮系统发生了不正常磨损。

进一步对谱片的观察发现，多数颗粒尺寸在 $8 \sim 30 \mu\text{m}$ 之间，呈薄片状，表面没有氧化或擦痕。扫描电镜观察到表面十分光滑。测试了十多个颗粒，其表面积与厚度之比约为 10:1 (图谱 12-3-3)。

表面光滑的颗粒是在低速下产生的，而氧化颗粒或表面已氧化的颗粒则是在高温、高速或润滑不良条件下产生的。这些大颗粒的特征与齿轮疲劳磨损颗粒特征相一致，也类似于滚动轴承产生的疲劳颗粒。但在这个系统中，这些薄片屑不大可能来自滚动轴承。当轴承与齿轮处于同一系统中时，对轴承的磨损失效监测是十分困难的。因为轴承的疲劳剥落颗粒在外形上与齿轮的疲劳剥落颗粒相类似，其差别只是后者的尺寸稍大一些而已。

综上所述，减速机中颗粒的产生原因可能有下述两种：

- 1) 齿轮过载 (没有出现擦伤或胶合)。
- 2) 齿轮滚动疲劳失效与滑动磨损失效的综合作用。

齿轮箱在进行铁谱分析 6 个月后损坏。化学公司确认损坏是设计不当，造成齿轮过载而损坏的。

(2) 润滑失效引起的严重滑动磨损和过载 用低倍双色光观察一工业齿轮减速机油样制成的谱片，发现入口处堆积有大量大颗粒，由此推断系统发生了严重磨损。

大颗粒表面有明显擦痕，呈薄片状且表面已有一定程度的氧化。还有一些具有光泽表面和不规则边缘的疲劳磨损颗粒。此外，还发现少量大切屑颗粒与铜颗粒。由此认为，油样中的颗粒主要来自齿轮的齿根和节圆部位，系统产生异常磨损的原因是由于齿轮油承载能力不够。

根据铁谱诊断结果发出了预报。拆卸齿轮箱后发现齿顶外表层已严重磨损。换用了含有极压添加剂的齿轮油之后，即能很好地解决了这一问题。

值得提出的是，对于渗碳淬硬钢齿轮系统，当加热其谱片时，谱片上颗粒的颜色将随其含碳多少从回火蓝色渐变到回火稻草黄色。即齿表面渗碳层磨损生成的颗粒如含高碳即呈蓝色，而未渗碳部位磨损生成的颗粒加热后则成稻草黄色，据此可以预测齿轮磨损程度。

(3) 齿轮箱中进水引起的异常磨损 用铁谱分析了两个含水的齿轮箱油样，事先并不知道油中混入了水，直读铁谱首先发现了高于正常值的读数， D_{11} : 40.6, D_{12} : 2.6。

采用偏振光观察谱片，发现了大量的红色氧化物，一些薄片屑表面也有氧化物层。同时还发现了大量大颗粒。铁谱诊断报告认为，润滑油进入了水，不仅导致氧化腐蚀，而且降低了润滑剂的承载能力，使齿轮发生严重磨损。

化学分析结果证明油中含水量已超过标准。

(4) 齿轮的磨料磨损 从运转中的减速机中取油样，制成谱片后发现了大量切削磨屑颗粒 (图谱 12-3-4)。采用偏振光检测谱片入口以及各颗粒链两端，发现了大量非金属晶体颗粒-泥沙。这表明，齿轮切削磨损是由于污染物进入摩擦表面而切削金属所引起的。建议更换润滑油和油过滤器，并检查污染物进入润滑油的途径。

采取上述防护措施后一个月，油样中颗粒又复到了正常范围。

(5) 正常磨损的铁谱与光谱诊断 曾用光谱仪监测了铁路机车用的封闭式齿轮箱。当油中铁含量达到 3000 ppm 时，光谱监测发出停机警报，然而铁谱分析却由于未发现异常磨屑颗粒而预报状态正常。检查表明，齿轮箱磨损状况良好，于是换油后

继续工作。

光谱与铁谱的诊断结果的差异主要在于两种方法的诊断原理不同,封闭式齿轮箱中生成的颗粒不断被润滑油带入摩擦副而被破碎,使得油中小颗粒总数不断增加,而小颗粒常常悬浮于润滑油中,使得光谱数值不断增大。因此,尽管并没有生成严重磨损颗粒,光谱监测也能报警,而铁谱则检测 $>1\mu\text{m}$ 以上的大颗粒,因此不会出现类似的误判。这个例子表明,铁谱诊断技术可以对其它诊断方法的结果加以验证,以提高诊断结果的可靠性。

(三) 液压系统油液的监测与诊断

1. 概述

液压系统广泛应用于那些要求运转机械必须有效、安全和经济地实行控制和驱动的各个现代工业部门,包括航天、航空、机械制造以及工程机械等领域。对其运转可靠性和磨损寿命有较高的要求。因此,在液压系统中应用铁谱技术进行状态监测,可有效地指导系统的维护与管理,早期发现可能引起严重损坏的隐患,并可对磨损程度、原因等进行分析,因而对提高液压系统运转可靠性与磨损寿命具有积极的意义。美国俄克拉何马州立大学流体动力研究中心曾采用铁谱技术进行液压系统状态监测和磨损分析的应用研究。通过对6台液压系统装置4年的试验研究,认为铁谱技术是一种有效的状态监测方法,不仅为设备操作和管理人员提供了准确的早期状态预报,同时能对系统发生磨损的原因进行分析。

2. 液压系统正常磨损状态的诊断

(1) 液压系统的正常磨损状态是指:

1) 液压系统运转正常,磨损在设计允许范围之内

2) 系统内主要摩擦副发生的是正常摩擦磨损,即磨损主要是表面剪切混合层的稳定剥落。

正常磨损状态的磨损烈度指数(I_s)和系统总磨损($D_i + D_s$)的数值应基本稳定,或在允许范围内波动。

(2) 正常磨损状态下生成的磨损颗粒的主要特征如下:

1) 对于设计要求磨损寿命长的液压系统,磨损颗粒主要是尺寸小于 $5\mu\text{m}$ 的正常摩擦磨损颗粒,每mL系统油样中大小颗粒总数一般不超过10DR单位,基本上不允许有不正常磨损颗粒存在。

2) 对于设计要求磨损寿命较短,工作条件恶劣的液压系统,磨损颗粒应以正常摩擦磨损颗粒为主,主要尺寸一般应小于 $10\sim 15\mu\text{m}$,油样中颗粒浓度一般应低于系统运转初期的颗粒浓度水平,或基本相近。在谱片入口处可以允许有小于该位置颗粒总数3%~5%的不正常磨损颗粒,如严重滑动磨损颗粒,氧化物或宽度在 $1\mu\text{m}$ 以下的切屑,以及一些外来污染颗粒等。

对于正常磨损状态,铁谱监测的预报是“正常”。如此时正值换油或维修,则可考虑延长其使用期。

图12-3-5显示出一个液压系统由跑合阶段进入正常磨损阶段的磨损趋势。跑合期间磨损烈度指数 I_s 及总磨损值较高,跑合结束后进入正常磨损,磨损值降低且保持稳定。该系统的磨损趋势变化规律与“浴盆形”曲线中前半部分相符。谱片入口处沉积的磨损颗粒均为尺寸小于 $5\mu\text{m}$ 的正常摩擦磨损颗粒(图谱12-3-5)。

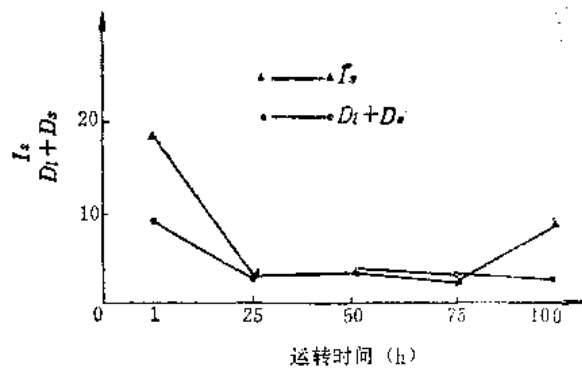


图12-3-5 一柱塞泵台架液压系统的磨损趋势曲线

3. 液压系统非正常磨损状态的诊断

液压系统非正常磨损状态是指系统出现了异于正常磨损,超出设计要求范围,尚未达到严重磨损程度的非正常磨损。此时,液压系统的运转仍很正常。

发生非正常磨损时,磨损烈度指数 I_s 和系统总磨损 $D_i + D_s$ 可能出现持续增加或较大的波动,有时变化正常,但从谱片上可以发现发生了非正常磨损。液压系统中非正常磨损的类型及其磨损颗粒特征包括:

1) 切削磨损 出现较多的、尺寸较细小的切屑或少量尺寸较大的切屑。

2) 严重滑动磨损 出现少量尺寸在 $15\mu\text{m}$ 左

右的严重滑动磨损颗粒和轻微粘着磨损颗粒，并常伴有一定数量的黑色氧化物。

3) 有色金属零件的磨损 出现一定数量的有色金属磨损颗粒如铜、铝、银等。

4) 腐蚀磨损 谱片入口处或出口处沉积有较多的细小的腐蚀磨损颗粒。

5) 疲劳磨损 疲劳屑增大至 $15\mu\text{m}$ 左右，且伴有较多的球状颗粒。

非正常磨损加快了系统的磨损速率，使系统磨损寿命大为降低，同时，潜伏着导致发生严重磨损的可能性。但是，由于非正常磨损可在较长时间内不影响机器正常运转及性能参数，因此，常常不被设备管理和操作人员所重视。

当判断系统发生非正常磨损时，铁谱监测发出的预报信号是“注意”。设备管理和操作人员应根据系统特点，采取适当措施，使非正常磨损状态恢复到正常磨损状态。这对提高机械使用寿命与运转可靠性是十分重要的。

图12-3-6是一台取料机悬回装置液压系统的磨损趋势曲线。对于设计磨损寿命较长的这类液压系统，磨损烈度指数出现了如此大的波动被认为是发生非正常磨损的信号。运转至3600h，在谱片入口处发现大量铜颗粒以及尺寸较大的严重磨损钢颗粒，表明系统出现非正常磨损。

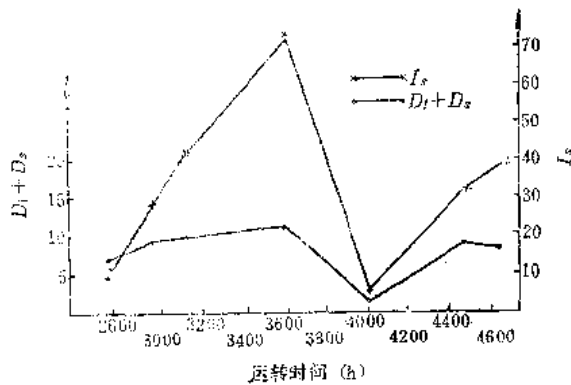


图12-3-6 一台取料机悬回装置液压系统的磨损趋势曲线

图谱12-3-6是一台起重机液压系统发生轻度磨料磨损后生成的切削磨损颗粒。

4. 液压系统严重磨损状态的诊断

液压系统的严重磨损状态表示系统发生了严重的磨损，摩擦副的磨损型式主要是严重滑动磨损、

粘着、切削或腐蚀磨损。系统的磨损率很高，零件的表面损伤程度较严重，有时可影响到系统的正常运转而出现油温升高、振动、噪声增大、油液变色等现象。

当系统出现严重磨损时，磨损烈度指数 I_s 和系统总磨损 ($D_1 + D_2$) 均明显增高，且始终维持在高水平。

液压系统中严重磨损类型及其磨损颗粒特征有下列几种：

1) 切削磨损 出现大量的尺寸较大的切屑，有些颗粒表面有过热现象。

2) 严重滑动磨损 谱片入口处沉积有大量的尺寸在 $15 \sim 30\mu\text{m}$ 的严重滑动磨损颗粒，并伴有其它的不正常磨损颗粒。

3) 粘着磨损 出现较多的弯曲条状或块状、片状粘着擦伤颗粒，大量黑色氧化物。大部分颗粒表面有明显过热现象。

4) 腐蚀磨损 谱片出口或入口处沉积有大量的润滑油变质产物和一定数量的污染颗粒以及细小的腐蚀磨损颗粒。

液压系统出现严重磨损时，系统磨损速率将急剧增大，并很快因过度磨损而失效。同时亦可能发展成破坏性磨损，造成系统突然损坏。

当判断液压系统出现严重磨损状态时，铁谱监测发出的预报信号是“警告”。此时，设备管理和操作人员应视具体情况采取适当的维修措施，并作必要的准备工作。

图12-3-7是一台QY5汽车起重机液压系统循环作业8000次后的磨损趋势曲线。由图可看出，经作业1600次以后， I_s 和 $D_1 + D_2$ 值即迅速增加，并始终维持在高数值水平，预示了该系统正处于严重磨损状态。取其作业3200次后的油样制作谱片，发现谱片入口处沉积了大量尺寸 $> 5 \sim 10\mu\text{m}$ 的颗粒，表明系统发生了严重磨损。进一步检测表明，严重磨损颗粒主要是铜颗粒、切屑以及粘着与擦伤颗粒。系统拆检结果，证实铜制滑靴及 GCr15 钢摩擦副均发生了严重磨损。

图谱12-3-7是该起重机液压系统循环作业3200次后生成的严重磨损颗粒。

5. 液压系统破坏性磨损状态的诊断

破坏性磨损状态对液压系统运行危害性极大。严重磨损状态常可发展成为破坏性磨损状态，主要取决于严重磨损方式及早期防范措施。

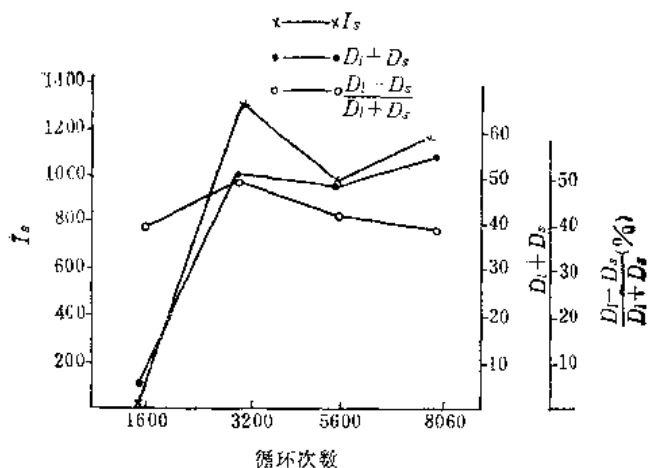


图12-3-7 一台QY 5汽车起重机液压系统的磨损趋势曲线

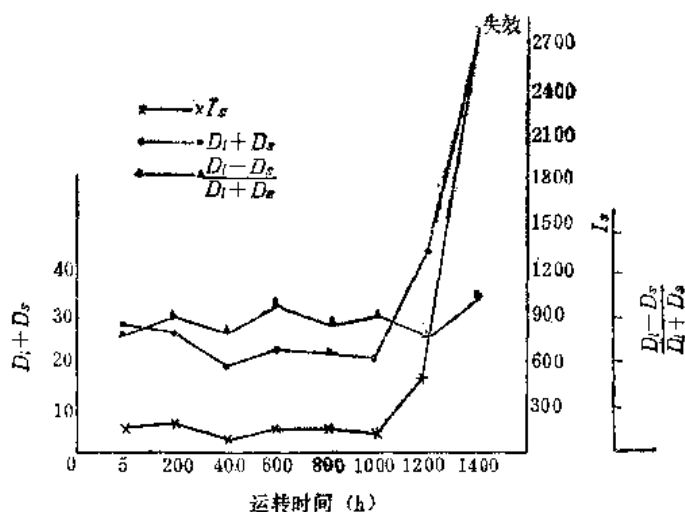


图12-3-8 一台W613铲车液压系统从正常到失效的磨损趋势曲线

出现破坏性磨损状态时，磨损烈度指数 I_s 和系统总磨损 $(D_i + D_s)$ 急剧增加，其数值常是正常磨损值的几倍甚至几十倍。

破坏性磨损状态的主要磨损方式及其颗粒特征是：

1) 破坏性切削磨损：磨损颗粒主要是粗大的切削屑，宽度可达 $10 \sim 20 \mu\text{m}$ ，长达数十微米或数百微米，且表面常有过热现象。

2) 破坏性粘着磨损：磨损颗粒中出现少量尺寸大于 $50 \mu\text{m}$ 或上百微米的大磨屑，主要颗粒是尺寸在 $15 \sim 30 \mu\text{m}$ 的粘着磨损颗粒与严重滑动磨损颗粒，长达几十或上百微米的弯曲条状擦伤颗粒，其表面常有明显过热现象，伴有大量黑色氧化物和切削屑等。破坏性磨损状态预报信号是“危急”，操作人

员应立即停机拆检。

图12-3-8中所示为一台W613铲车液压系统从正常磨损至破坏性磨损及失效的过程。根据磨损趋势曲线，可看出在 $1300 \sim 1400 \text{ h}$ 时，系统已处于破坏性磨损状态。但磨损颗粒的观察结果却不及定量铁谱结果明显。在 1408 h 时，油样中发现了几个尺寸在 $100 \sim 175 \mu\text{m}$ 的严重磨损大颗粒，似乎预示了严重磨损状态正在向破坏性磨损状态转变。同时还发现油样已严重污染，油样中进入大量泥沙是造成系统发展为破坏性磨损的原因之一。

根据铁谱诊断结果向使用部门发出了警报，几天后系统叶片泵损坏。

图谱12-3-8是一台柱塞泵液压系统发生的灾难性切削磨损时所生成的大量切削磨损颗粒。

参 考 文 献

- [1] 科拉科特著. 机械故障的诊断与情况监测. 孙维东等译. 北京: 机械工业出版社, 1983
- [2] Anderson D P. Wear Particles Atlas. (Revised). Naval Air Engineering Center. 1982
- [3] Seifert W W., Westcott V C. A Method for the Study of Wear Particles in Lubricating Oil. Wear. 1972, 21(1), 22~42
- [4] Bowen E R., Scott D., Seifert W W., Westcott V C. Ferrograph. Tribology International, 1976, 9(3), 109~115
- [5] Jones M H. Condition Monitoring '84. Swansea: Pineridge Press. 1984
- [6] Jones M H. Ferrography Applied to Diesel Engine Oil Analysis. Wear. 1979, 56(1), 93~103