

机 修 手 册

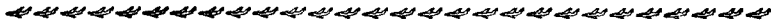
(第 3 版)

第 8 卷
设备润滑

机械工业出版社

第12章 机械设备润滑状态的监测与诊断技术

胡大樾 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：如润滑剂供送情况（压力、流量等）、润滑剂的有效性（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	1.一般碎片 (1) 圆形的、“玫瑰花瓣”式的，径向分开的形式 (2) 高度光亮的表面组织，带有暗淡的十字线和斑点痕迹 (3) 细粒状、浅灰色、闪烁发光 2.钢球的碎片 (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 (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“体形”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 (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 (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 3.滚道的碎片 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

(续)

序号	磨屑来源	特征
2	滚柱轴承	1. 滚柱的碎片 (1) 通常为长度等于 2~3 倍宽度的卷曲矩形状 (2) 高度光亮的表面 (3) 细粒状、浅灰色、闪烁发光 (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 (5) 下层材料是长的, 并呈撕裂状, 其颜色比表面碎片较黑 2. 滚道碎片 (1) 不规则的长方形 (2) 高度光亮的表面组织, 沿运行纵向带有划痕 (3) 细粒状、浅灰色、闪烁发光 (4) 由于表面是平的滚动接触, 因而划痕是沿滚道方向 (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 (6) 内滚道首先恶化, 继而是滚柱, 最后是外滚道
3	滚珠和滚柱轴承	1. 绕转和打滑碎片 (1) 形状通常是粒状的 (2) 碎片是黑色尘粒 2. 保持架的碎片 (1) 是大而薄的花瓣形鳞片 (2) 有光亮的表面组织 (3) 呈铜色 (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铅微粒, 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
4	滚针轴承	(1) 尖锐的针形, 与刺类似 (2) 粗的表面组织 (3) 深灰色闪烁发光
5	巴氏合金轴承	(1) 平的或球形的一般形状 (2) 平滑的表面组织 (3) 类似焊锡飞溅物或银的外表 (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 (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, 在轴承表面局部油压作用下, 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
6	铅/20%锡轴承	(1) 不规则的形状 (2) 平滑的表面组织, 并有细的平行线纹 (3) 外表像焊锡状, 银色带有黑线纹 (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

(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, 并有明显刻痕, 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子轴承的碎片类似 (6) 下层的碎片是很不规则的, 长而撕裂。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件的磨损状态。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叠积聚, 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

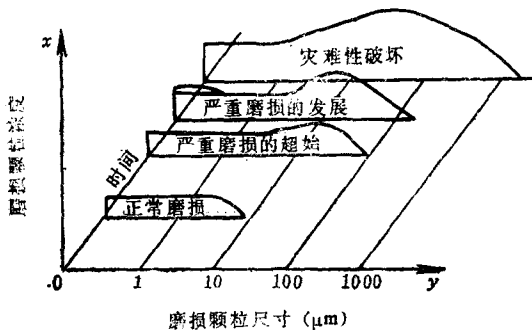


图12-1-1 润滑系统磨损的发展过程

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。

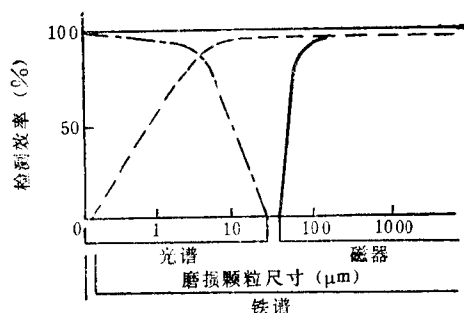


图12-1-2 磁塞、光谱与铁谱的检测效率与磨损颗粒尺寸的关系

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照射活化零件,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量来度量和监控零件的磨损情况,放射性量为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

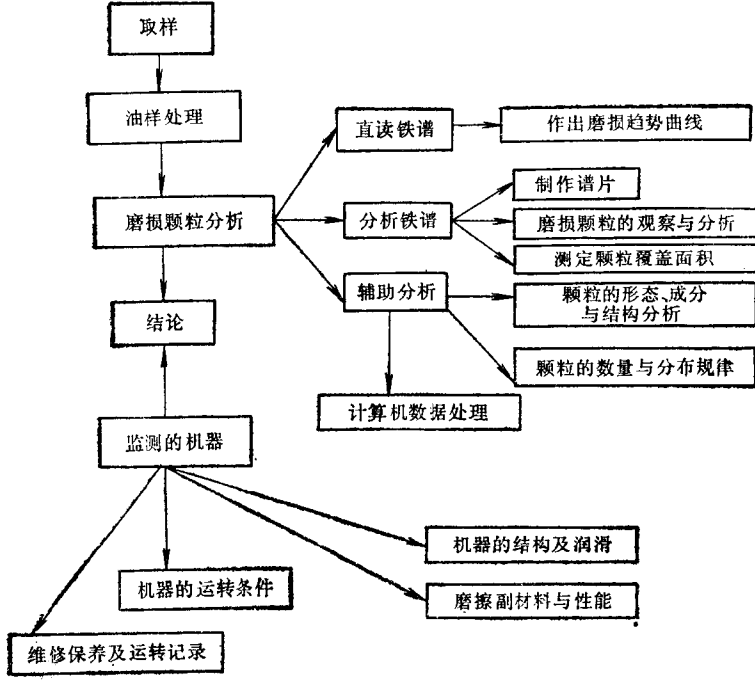


图12-1-3 铁谱技术的示意图

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。

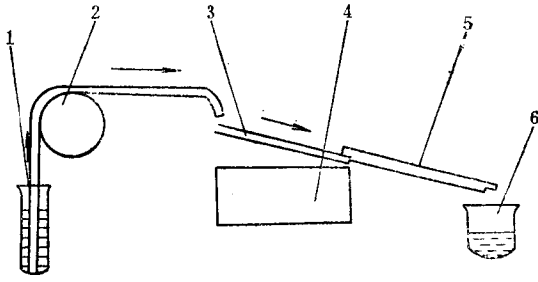


图12-2-1 分析式铁谱仪工作原理图

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0.17 mm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“潜位”。

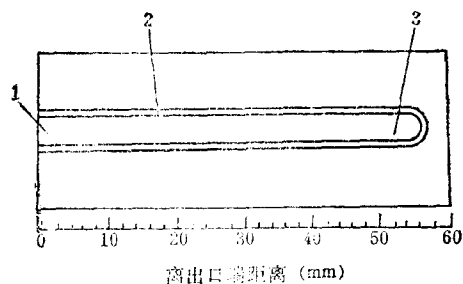


图12-2-2 铁谱基片

1—油样出口 2—栅栏 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4.0~5.0 T/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

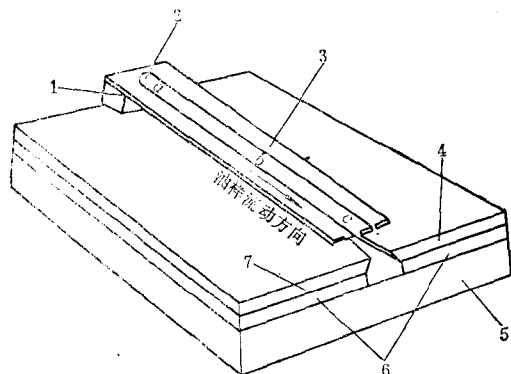


图12-2-3 磁场装置简图

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,入口端搁于台阶上,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。

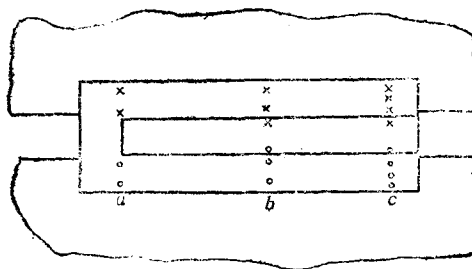


图12-2-4 基片表面的磁场分布

○—磁场方向从纸面垂直向上
 $\times$ —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-

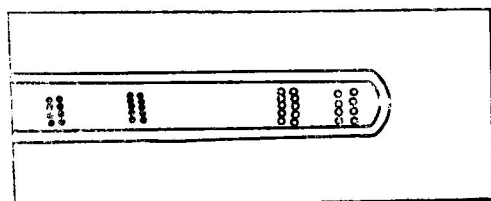


图12-2-5 谱片上磨损颗粒排列示意图

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。

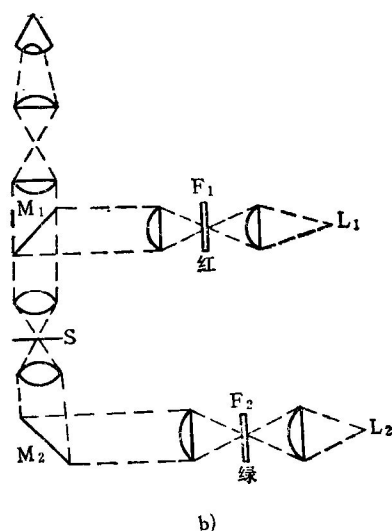
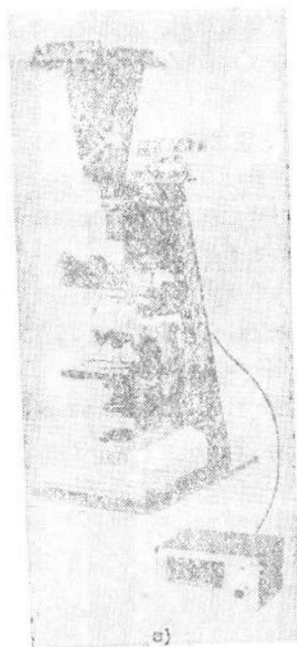


图12-2-6 铁谱显微镜及其光路原理

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 $100\times$ 的高数值孔径干物镜, 其分辨率为 $0.26\mu\text{m}$, 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透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 $5\mu\text{m}$ 的大颗粒首先在进口处沉淀下来, $1\sim 2\mu\text{m}$ 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

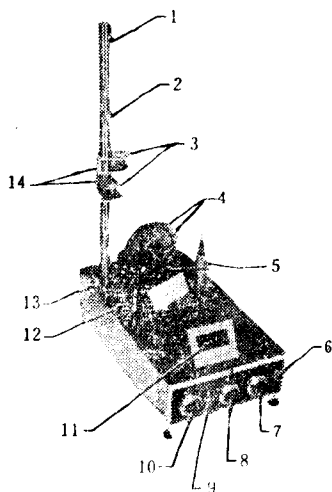


图12-2-7 直读式铁谱仪

1—支柱 2—毛细管固定环 3—托架支座 4—光纤导管 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 $5\mu\text{m}$ 和小于 $2\mu\text{m}$ 的磨损颗粒数量。

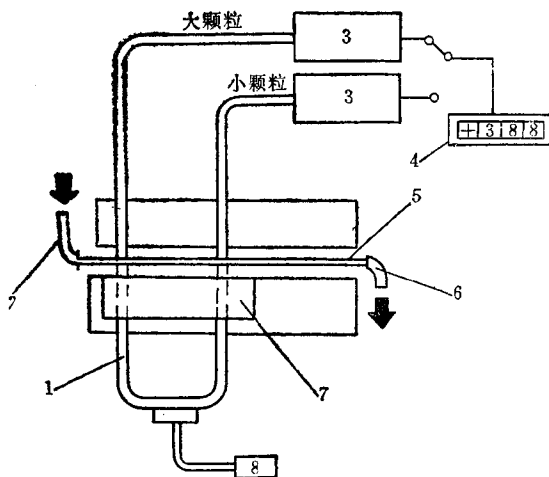


图12-2-8 直读式铁谱仪结构示意图

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 $0\sim 1000$ 。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

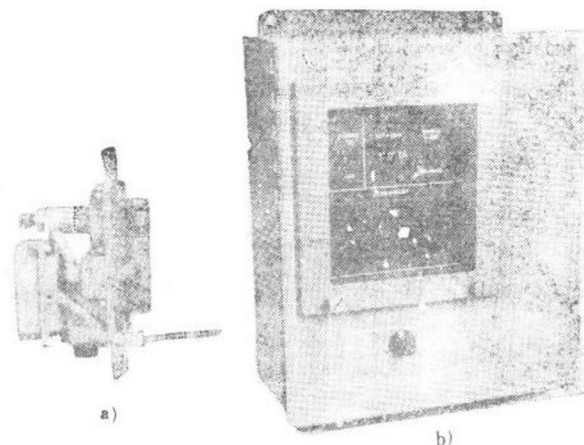


图12-2-9 在线式铁谱仪

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 ~30min。

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辗碎或不能通过。

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 and 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

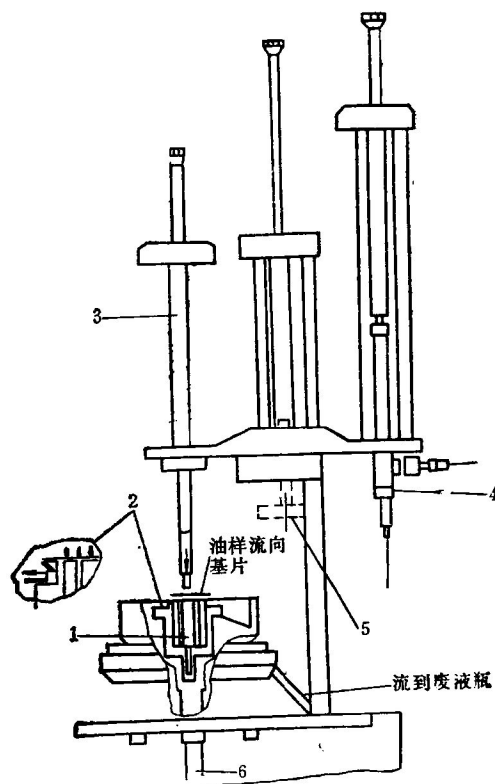


图12-2-10 旋转式铁谱仪原理图

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。

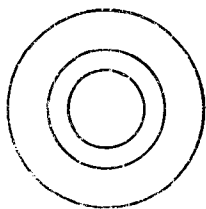


图12-2-11 旋转式铁谱仪制备的谱片上磨屑排列示意图

(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工况变化的磨损颗粒,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,应避免从管底部取油样。
- 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) 应选择在机器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： $65 \pm 5^\circ\text{C}$ ；加热时间：大于30 min。

2) 搅拌可在专用搅拌装置上进行，或采用手持样品瓶猛烈摇晃的方法。务必使颗粒分布均匀，瓶底部肉眼应观察不到有沉淀。

3) 经加热摇晃后，样品应立即进行铁谱分析，停放时间过长，则应重新进行加热搅拌。

(2) 稀释

1) 浓度稀释 当所取油样中颗粒浓度过高时，油样中磨损颗粒量与铁谱仪读数之间将不存在线性关系，同时也难于观察谱片上磨损颗粒的形态。因此油样应采用清洁油稀释后才能进行铁谱分析。浓度稀释操作要求如下：

① 稀释油与原油样应为同一类油品，例如两者均为互不发生反应的矿物油。

② 稀释油应经 $0.45\mu\text{m}$ 滤膜过滤，粘度低且透明。

③ 经稀释后油样中颗粒浓度应控制在每 mL 油样的直读数 (D_1 , D_2) 在 $5 \sim 80$ 范围内。

2) 粘度稀释 由于油样的粘度对颗粒的沉降速度有很大影响，因此要对油样进行粘度稀释，使稀释后油样的粘度在某一合适范围。粘度稀释操作的要求如下：

① 粘度稀释采用四氯乙烯。

② 粘度稀释比例。

一般为直读铁谱 1:1，即 1 mL 油样:1 mL 四氯乙烯，

分析铁谱 3:1，即 3 mL 油样:1 mL 四氯乙烯。

对于一些粘度很高的油样，可视情况适当增大稀释剂量。

(3) 润滑油的处理 主要是选择一种溶解方

法，使油脂试样溶解或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) 所取润滑油应具有代表性，数量至少应在 50 mg 以上。

3) 将润滑油放入已盛有 10~20 mL 溶剂的透明玻璃瓶中，瓶的大小应保证有 $1/3 \sim 1/4$ 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 3~5 mm 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。

3. 铁谱仪的操作

关于铁谱仪的操作方法，可参阅其产品操作说明书，这里仅对一些必须遵守的原则加以说明。

(1) 直读式铁谱仪的操作

1) 测量直读数据一般用 1 mL 油样 + 1 mL 四氯乙烯。当油中颗粒浓度低时 (D_1 及 $D_2 < 5$)，可增加油样量，但其与四氯乙烯比值 1:1 应不变。

2) 测定时应等待至试管中的样品已全部虹吸完，而且毛细管中的油样也停止流动，数显读数基本稳定后再记录读数。

3) 当油样中所含有机物及污染物较多，颜色很深时，应采用不透明油样操作方法，即用四氯乙烯调零，最后再用四氯乙烯冲洗并读数。

(2) 分析铁谱仪的操作

1) 一般制备谱片用油样为 3 mL 油样 + 1 mL 四氯乙烯，根据油样中磨损颗粒的浓度，可适当增减油样量，但其与四氯乙烯之比值 3:1 应基本不变。

2) 谱片上大小颗粒覆盖面积百分数 A_1 和 A_2 值的测定的方法为：

① 选择在谱片上油样流动通道之外，表面清洁程度能代表谱片上大部分表面的位置调零。

② 在谱片入口处附近，沿 X、Y 方向扫描以得到覆盖面积之最大值作为大颗粒覆盖面积百分数 A_L 值。

③ 从 A_L 处沿 X 轴往油样出口方向移动 5 mm，再沿 Y 轴方向扫描，以读得的最大值作为覆盖面积百分数 A_L 值。

④ 若 A_1 、 A_2 处发现有明显的外来杂质和非磨损颗粒，则应改在附近适当位置测量。

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_1 _____ A_2 _____

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℃	400℃	480℃	540℃
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	褐色到古铜色	深古铜色带蓝斑点		
A 型镍钢	高镍合金	无变化	无变化	古铜色, 大多数颗粒带蓝色	所有粒子带蓝色或蓝灰色
0Cr18Ni9 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, 一些颗粒显示蓝斑
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℃、400℃、480℃和540℃。将谱片放入已调好温度的加热器，保温90 s，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

利用扫描电镜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.Bowen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），该图谱汇集了许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（Shear mixed 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跑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① 12-2-1、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 是形状像车床切屑的磨损颗粒，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的夹杂物，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粒，图谱12-2-5为单个切削磨粒。

(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已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，因为这种球状粒子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薄片，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。当然在整台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