

润滑剂 / 磨粒分析

Ray Dalley, PREDICT; 常英杰 译

摘要

磨粒分析，特别是铁谱分析是识别和确定维修需求的有效方法。目前技术的发展方向包括图像分析，在线传感器，便携式筛选工具，自动化油分析筛选工具，评价结果的电子传送，和人工智能。

磨损是机器部件间表面接触的必然结果，如轴、轴承、齿轮、和轴衬等，即使在很好润滑的系统中也是不可避免的。设备的寿命预期、安全因素、性能等级和维修推荐是基于正常发生的磨损预测的，然而，设计的复杂性、大小尺寸、复杂的装配结构、以及运行条件和环境的变化等因素使得维修或修理的需求（日常和紧急）在不停机的情况下难以评价或发觉。

由于现代设备系统的高速、集成化和自动化，任何停机都会导致生产停止和高代价，因此，非中断性诊断技术诸如油液光谱分析、振动分析、电动机电流分析，和铁谱分析（磨粒分析）越来越多地应用于动力，过程，半导体和制造业。机器的设计者和制造者越来越多地使用磨损分析作为一个现实的标准来改善诸如压缩机、齿轮、轴承和透平部件这些产品。本论文介绍磨粒分析技术，结合其他预测维修工具阐述其在工业中的作用。

磨粒分析/铁谱分析

铁谱分析是一项对从各种流体中分离出的磨损颗粒进行微观检验和分析的技术。作为一项预测维修技术起源于二十世纪七十年代中期，它最初用于用磁力沉淀润滑油中的铁磁磨损颗粒，这项技术被成功应用于监测军用飞机发动机、齿轮箱和传动系统的状态。其成功加速了其他应用的开发，包括方法的修改可用于沉淀润滑剂中的非磁性颗粒，在一个玻璃衬底上定量分析磨损颗粒（铁谱），以及精致油脂溶剂用于重型工业。用于磨粒分析的三种主要仪器是直读铁谱仪，分析式铁谱仪和铁谱显微镜。

直读(DR) 铁谱仪

直读铁谱仪是一个趋势监测仪器，通过对定期采集油样的检查实行状态监测。DR直读铁谱仪是一个紧凑的便携式测试仪器，容易使用甚至可以被非技术人员操作，它定量测量铁磁磨粒在润滑或液压油中的浓度。直读铁谱仪的工作原理是：通过一个强磁场将油样中颗粒沉淀到一个玻璃管的底部，然后用光纤束直接照射在玻璃管的由永久磁铁沉淀大颗粒和小颗粒的两个部位。测试开始时，在颗粒开始沉淀之前，仪器利用微处理器芯片自动“调零”，随着光束通过油液调整适应其不透明性。光的亮度的减小与沉积在玻璃管中的颗粒数量有关，它被监测和显示在仪器的LCD屏幕上。可以获得两组读数：大颗粒 >5 微米 (DL) 和小颗粒 <5 微米 (DS) 的读数，磨损颗粒浓度WPC通过DL + DS 除以样品容积获得，建立一个机器磨损趋势基线。



图 1: 直读铁谱仪

刚开始服役的机器进入一个磨损过程，在这个过程中大颗粒的数量迅速增加然后在正常运行状态下稳定在一个平衡浓度。铁谱分析的关键点是，异常磨损的机器将产生异常大量的磨损颗粒，直读铁谱仪用WPC读数指示过分磨损状态，如果 WPC 读数超出了正常趋势，需要制作一个流体的铁谱片以使用光学显微镜进行检查。

分析铁谱仪

使用分析式铁谱仪系统可以获得关于磨损采样的进一步信息，它可提供样品的永久记录以及分析信息。分析式铁谱仪用于准备（铁谱）一个固定的磨粒谱片，以便显微镜检查和照相存档。铁谱是一个重要的预测工具，因为它提供对特定设备部件的典型的磨损类型的识别。当颗粒沉淀到谱片上后，利用固化剂冲洗掉残存的油液或水基润滑剂，当固化剂挥发后，磨粒永久附着在玻璃基片上以便显微镜检查。



图 2 制谱仪

铁谱显微镜

谱片一般在结合了生物和金相显微镜特性的铁谱显微镜下进行检查，它利用反射和发射两个光源，并可以同时使用；还利用绿色、红色、和偏振滤光来区分铁磁和非铁磁颗粒的尺寸、成分、形状和纹理，这些是正确诊断的关键要素。



图 3 铁谱显微镜

磨粒的类型

磨损过程一般产生六种基本的磨粒类型，包括铁磁和非铁磁颗粒的组合：

1. 正常研磨颗粒：

正常研磨颗粒是正常磨损的结果，源于剪切混合层部分的脱落。研磨颗粒由扁平的小片组成，通常为 5 微米或更小，尽管有时它们可能达到15 微米取决于设备应用。在磨粒表面应该几乎没有可见的纹理，小片的厚度应该是1微米或更小。

2. 切削磨粒：

切削磨粒是一个表面刺入另一个表面产生的结果，有两种产生这种结果的方式。

其一，一个相对坚硬的部件可能不对中或断裂，导致锐利的边缘刺入较软的表面，这种方式产生的颗粒一般是粗糙和较大，平均2至5 微米宽，25至1000微米长。

其二，润滑系统中硬的研磨颗粒，或者作为污染例如沙拉，或者作为来自系统其他部件的碎片，可能植入一个软的磨损表面（两物体磨损）诸如一个铅/锡合金轴承，研磨颗粒从软的表面突出并刺入另一个磨损表面。这种方式产生的切削磨损颗粒的最大尺寸取决于润滑油中研磨颗粒的大小，可能产生非常细的丝状颗粒，厚度小至0.25 微米，有时候由于在一个磨损表面存在硬的内含物，可能产生5微米长25 微米厚的小颗粒。



图4 切削磨损

切削磨粒是不正常的，应认真监测其存在和数量，如果系统中大部分切削磨粒是几个微米长和几分之一微米宽，应怀疑是存在微粒污染。如果一个系统呈现增长的大 (50 微米长) 磨粒，预示着一个部件故障。

3. 球形磨粒:



图 5 典型的疲劳散裂

这些颗粒产生于轴承疲劳裂纹,球形颗粒存在提供迫近的故障的早期报警,它在任何实际的散裂发生前是可以检测到的。滚动轴承疲劳不是球形金属颗粒的唯一根源,我们知道焊接或摩擦过程(污染)产生球颗粒,疲劳产生的球体与其他机理产生的球体的不同在于其尺寸分布,滚动疲劳几乎不产生大于5微米直径的球体,而焊接和摩擦产生的经常是大于10微米直径的球体。

4. 剧烈滑动:

剧烈磨损颗粒在其表面存在平行的条痕,这些条痕相互平行并与颗粒的长轴平行是其识别特征。

它们一般长度大于15微米,厚度在5和30微米之间。剧烈滑动颗粒有时呈现回火的颜色,它在热处理后可能改变颗粒的外貌。



图 6 剧烈滑动

5. 轴承磨粒:

这些独特的颗粒类型与滚动轴承疲劳有关:

疲劳碎片颗粒源于当金属表面凹痕或裂纹扩大时产生的剥离,在微散裂过程中这些颗粒达到最大尺寸100微米,疲劳散裂一般是扁平的,主要长度厚度比为10比1,其表面平坦,圆周呈随机不规则形状。

薄片颗粒是非常薄的游离金属颗粒,其上通常带有小孔,主要尺寸方向在20至50微米之间,与厚度之比为30:1,这些颗粒是磨损颗粒通过滚动接触时形成的。薄片颗粒可能在轴承的整个寿命周期中产生,但是在疲劳散裂开始时产生的数量增加。除了球形磨损外,薄片颗粒数量的增加是滚动轴承疲劳微破裂的指示。

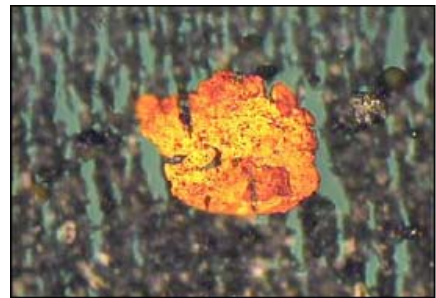


图 7 轴承磨损

6. 齿轮磨损:

齿轮涉及两种类型的磨损:

节圆线疲劳颗粒源于齿轮节圆线,非常类似于滚动轴承疲劳颗粒,它们一般有平坦的表面并且通常为不规则的形状。取决于齿轮的设计,颗粒的主要尺寸与厚度比在4:1和10:1之间,矮胖颗粒由齿轮表面的拉力产生,使在散裂之前疲劳破裂扩展深入齿轮的齿。

刮伤或划伤颗粒是由于负荷太大和/或转速太高引起的,颗粒倾向于具有粗糙的表面和锯齿状的边缘,即使小的颗粒也可以通过这些特性与研磨磨损辨别,一些大颗粒在其表面具有条纹表面滑行接触。由于刮伤道热特性,通常出现大量氧化物,并且一些颗粒可能呈现部分氧化迹象,即棕褐色或蓝回火色。还出现许多其他颗粒类型,一般描述颗粒形态或起源,诸如矮胖、黑色氧化物、红色氧化物、腐蚀物等等。除了铁活非铁物质之外,还出现污染颗粒,可能包含:沙子和污泥、纤维、摩擦聚合物、和污染球。

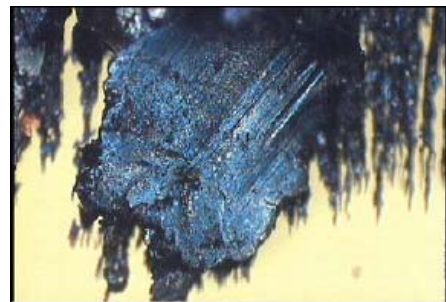


图 8 齿轮磨损

污染颗粒通常被认为是不正常部件磨损的唯一最重要的根源，由污染引起的磨损一般导致形成大颗粒，形成的速度取决于过滤系统的效率，事实上，一旦颗粒产生并随润滑剂流动，它即是一个污染。

用过的油的分析

铁谱分析检查和评价机器的磨损状态，然而用过的油液的分析针对润滑剂的状态（可用性）。用过的油分析(UOA) 技术包括对溶解在油中的元素的光谱分析（颗粒尺寸一般不大于5-7微米），傅立叶变换红外光谱仪(FTIR)用于测试油液的物理和化学变化，运动黏度测试确定油液黏度的降低，各种化学滴定法确定碱性储量的损耗或油液酸性(TAN & TBN)的增加，以及化学或蒸馏法确定水分含量。

Reasons	Phrases	VIPA	Analysis	Images	DR/Visc	Titration/Visual	Metals	FTIR	Particle Count	Misc	Rotrode	Navigator										
Reference:	0	0	0	0	1	1	0	1	2	0	0	0	1	0	8	0	168	147	0	1	0	
SampleDate	Fe	Cr	Al	Cu	Pb	Sn	Ag	Ni	Si	Na	K	B	Mo	Mg	Ca	Ba	P	Zn	Cd	V	Ti	Mn
Sep 10, 2003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	174	69	2	0	0	
Apr 10, 2003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	38	14	0	0	0	
Dec 13, 2002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	78	19	0	0	0	
Sep 18, 2002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	97	39	0	0	0	
Jun 12, 2002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	116	36	0	0	0	
Feb 27, 2002	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	71	19	0	0	0	
Nov 08, 2001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	98	25	3	0	0	
Jul 17, 2001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	165	77	1	0	0	
Mar 22, 2001	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	167	58	0	0	0	
Jan 27, 2000	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	3	174	65	0	0	0	
Oct 12, 1999	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	175	82	3	0	0	

图 9 典型的元素筛

光谱元素分析

光谱分析法包括原子吸收(AA)，原子发射光谱 (AES)，感应耦合等离子发射光谱(ICP)。在这些方法中，原子发射光谱和感应耦合等离子，依赖于检测元素的光发射，因为成本、速度和其他因素，是最广泛应用的技术。

傅立叶红外光谱仪

FTIR 广泛用于确定润滑剂的水分和冷却液污染，以及识别和监测添加剂的损耗和氧化物的增加。通过将用过的油的光谱减去新油的光谱得到的差光谱明确揭示变化。

粘度

可能润滑剂最重要的单个特性是其黏度，它是润滑油膜在厚和薄油膜状态之下形成中的一个因数，它影响轴承、缸体、和齿轮的发热；影响油的密封效果，以及消耗或损失；使机器从冷态启动变得容易。对任何设备，获得满意结果的第一基本要点是使用合适黏度的油来满足运行条件。黏度的降低可能指示溶剂、或燃料或低等级黏度油的污染；黏度增加可能指示润滑剂氧化或高等级黏度油的污染。

总酸值

酸度指示润滑剂的氧化程度及其对外界源如燃烧气体的抗酸能力。润滑剂的酸度通过中和和所需求的氢氧化钾的量(mg KOH/g)来测量，此结果称为TAN (总酸值)。在大部分新油中，添加剂贡献一定的TAN 或酸度，然而确定和监测对新油参考值的变化是关键的，TAN 的增

加可能指示油液氧化或酸性物质的污染,高TAN值指示严重退化的润滑剂可能有很大腐蚀性。

卡尔费希水分测试 Karl Fischer

这个测试当电流通过一个网筛时产生碘,用于产生碘和除掉存在的水分所需的电流被测量,并被转换成ppm。水污染的量化—润滑剂中的水分不仅加速腐蚀和氧化,而且可形成一种乳状液,具有软淤泥的外观。

柴油机应用

柴油发动机的磨损颗粒分析一直是与其他测试方法通常是光谱分析结合使用获得很好的结果。像其他油液润滑的设备一样,指示磨损的量是:增加的磨粒数量,颗粒尺寸分布、成分合外貌形态的改变。发动机运行状态对气缸衬垫,活塞环,和曲轴主轴承磨损的影响已经被磨损颗粒和用过的油的分析成功地观测。对柴油发动机来讲,铁谱的热处理识别功能区别低合金(曲轴)和铸铁(活塞环和缸体衬垫),当然取决于特定发动机冶金,尽管主要分析铁磁颗粒,其他颗粒例如铅可被部分保留用于跟踪轴承磨损。柴油发动机正常油样和铁谱一般只呈现小的研磨磨粒,在光谱分析测试中低的含铁量,通常在铁谱谱片的出口处轻微沉淀腐蚀磨损颗粒。柴油机暴露在主要由含硫燃料引起的酸性环境,在美国这越来越不成问题,因为环境规章的制约。任何情况下,TAN测试过程确定柴油机润滑剂的酸值。柴油机常见的磨损问题是孔腔磨光和环磨损,孔腔磨光使缸壁从斑点抛光成镜面,这两个问题都已一定程度产生活塞沉淀物。这个磨损机理导致磨粒增加,磨粒分析和光谱分析都可检测到。

飞机气体涡轮机应用

飞机和飞机派生的喷气发动机有各种故障机理,一些故障模式发展非常迅速,而另一些可在达到停机状态前数百小时可被检测到。很多气体透平故障发生在气体通道,气体通道故障经常发生,但不是总是发生,引起磨粒尺寸及其在油系统中的浓度增加,可能由于不平衡力向透平轴承和其它油润滑部件的传递,然后,产生的轴承和齿轮磨损颗粒可以被用过的油分析和磨粒分析检测到。因为润滑油路的复杂性,在气体透平中确定准确的磨损问题根源可能是困难的,一般几个空腔、轴承箱、或齿轮将通过连接到油箱的单独的回流线强行润滑,从油箱油被泵(以高速率)出,通过一个过滤器和热交换器,进行循环。磁削检测器或磁塞通常安装在各个发动机部件的回油线上,这可以帮助找出发生问题的根源,尤其当颗粒冶金,如热处理铁谱所确定的那样,对各个发动机部件是相似的情况下。然而铁削检测器只是在磨损状态严重到产生非常大的颗粒时才给出报警,这个时候预测维修的机会可能丧失。其它分析技术例如振动分析可以帮助找出问题部件,可利用专家系统软件提供维修建议。任何情况下,预测维修工具集成在一起提供给维修工程师最好的决策工具。

结论

自动化的利益在于利用计算机程序和出现的人工智能软件技术帮助确定何时停机进行维修,例如一个先进的系统集成振动分析技术,用过的油分析,铁谱分析,电动机电流分析,热图像,超声,电子学,微处理,图形,和数据管理,可以有规律地对大量机器采样。从一个采样装置,与以前的样本比较获得趋势信息(以及其它数据参数),作出机器的维修计划决策,对维修部门产生工作单,并发送采购/工单采购需要的修理部件。维修管理者/工程师可以通过互联网得到几乎即时的关于每台机器状态的报告,以及费用金额指示停机和其它维修需求的最佳日期。技术的进步倾向于维护和结合所有生产数据服务于生产设备的有效评价。正如我们所知,今天的企业比任何时候都不能承担任何停机,由于世界范围内大规模的再造工程或缩小化,因此,预测维修工具与生产效率的结合,用资金流模式进行分析,是今天和明天的决策工具。