
铁谱技术原理 及应用

林朝桢 秦立高 王玉平 编著

机械工业出版社

铁谱技术原理及应用

林朝桢 秦立高 王玉平 编著



机械工业出版社

铁谱技术是70年代国际摩擦学领域里出现的一种新技术，主要应用于摩擦磨损机理的研究、润滑油的油品评价、机器工况监测与故障诊断以及生物医学工程等方面。

本书分六章，较全面系统地介绍了铁谱技术的发展概况、各种铁谱仪的工作原理和结构、铁谱操作技术、检测技术、诊断技术和铁谱技术的应用等。

本书可作为从事机械设备管理和维修的工程技术人员、操作人员的培训教材，亦可供高等院校和中等专业学校机械类师生、科研、设计部门和工厂有关技术人员参考。

铁谱技术原理及应用

林朝桢 秦立高 王玉平 编著

*

责任编辑：蒋虹 版式设计：吴静霞

封面设计：郭景云 责任校对：熊天荣

责任印制：王国光

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092¹/₃₂·印张 4¹/₄·字数 90千字

1990年4月北京第一版·1990年4月北京第一次印刷

印数 0,001—1,000·定价：3.80元

*

ISBN 7-111-01949-0/TG·494

前 言

70年代初期，铁谱技术一出现，在国际摩擦学界即引起广泛的重视。它不仅为摩擦学研究开辟了一条新的途径，也为机器工况及磨损状态监测增添了一种新的手段。铁谱技术从最初在发动机上应用开始，已扩展到液压系统、齿轮蜗轮传动箱、轴承等零部件上，并被广泛应用于冶金、矿山、机械、汽车、铁路、船舶、煤炭、化工、建筑等行业。目前，铁谱技术不仅在摩擦磨损机理、油品评价方面，而且在生物医学工程等方面，也显示了良好的应用前景。

铁谱技术的信息是70年代后期才传入我国，到80年代中期，我国铁谱技术已有了很大发展，已形成一支由高等院校、科研单位和工矿企业组成的技术队伍。但是，我国开展铁谱技术的研究和应用毕竟起步较晚，有关铁谱技术的原理、仪器结构、操作、分析技术和应用等，对广大机械行业的工作者来说，还是很陌生的。为了进一步应用与推广铁谱技术，根据国内外有关资料，并结合我们的工作实践，编写了这本书。

本书编写组在撰写前对全书内容经过充分讨论，由林朝桢执笔，初稿完成后又经过编写组反复认真审阅、修改。即使这样，由于作者水平和资料所限，书中难免有错误和不妥之处，恳请读者批评指正。

在编写过程中，曾得到榆次液压配件一厂、榆次市双金属轴承厂的大力支持和帮助，吴骏鸣同志还提供了不少资

IV

料。本书承北京航空航天大学郭可谦教授审阅，提出很多宝贵意见。在此一并表示感谢。

编者

1988年12月

目 录

第一章 概述	1
第二章 铁谱仪的工作原理与结构	7
一、分析铁谱仪	7
二、直读铁谱仪	15
三、“在线”铁谱仪	17
四、旋转铁谱仪	19
五、气动铁谱仪	21
第三章 铁谱操作技术	24
一、铁谱取样技术	24
二、油样处理	29
三、铁谱仪操作	33
第四章 铁谱检测技术	36
一、定量铁谱名词术语	36
二、铁谱定量读数和主要性能指标	39
三、用铁谱光密度法检测	54
四、用铁谱显微镜检测	57
五、用扫描电子显微镜和X-射线分析	59
六、用铁谱片加热法与热浸法检测	60
第五章 铁谱诊断技术	65
一、诊断技术原理	65
二、黑色金属及其氧化物磨损微粒的识别	71
三、有色金属磨损微粒的识别	80
四、腐蚀磨损、聚合物和各种非金属物质的识别	83
第六章 铁谱技术的应用	88
一、摩擦磨损机理的研究	88

Ⅶ

二、机械设备的工况监测与诊断	97
三、新机器及其部件的摩擦学设计	107
四、对润滑剂性能的评价	112
五、其它方面的应用	123
参考文献	126

第一章 概 述

铁谱技术 (Ferrography) 是70年代国际摩擦学领域里出现的一项新技术。它是利用铁谱仪 (Ferrograph) 从润滑油 (脂) 试样里, 分离和检测磨损微粒和碎屑, 从而分析和判断机器运动副表面磨损的类型和程度的技术。

机器在运转时, 由于零件表面的相互运动, 不可避免地要产生摩擦磨损, 从而不断产生磨损粒子和碎屑 (以下简称“磨损微粒”或“微粒”)。这些磨损微粒, 在润滑油中常呈悬浮状态, 它们的数量很多, 在一升油中有时可达 10^{12} 个, 而尺寸极其微小, 通常在几十纳米到几十微米之间^[1], 是肉眼看不见的。磨损过程所产生的微粒, 具有不同的形态和尺寸, 反映和代表了不同的磨损形式和机理。因此, 检测和分析这些磨损微粒, 根据这些微粒的形状、数量、尺寸大小、材料成分、表面形貌和粒度分布等情况, 便可判断机件的磨损状态。这对研究机件的摩擦磨损过程、机理、速度和机件的工作状态等具有特殊的意义。

长期以来, 国内外对机器设备的检测和维修, 一直是采用按计划维修的“定期维修”制度, 这在生产上曾起过积极作用, 避免了一些重大事故的发生。目前, 这种定期维修制度, 在国内外工厂还被广泛采用。但这种制度有两个明显的缺点, 一是对正常磨损的还不需要检修的机器, 亦按计划定期进行检修, 造成大量人力、物力的浪费, 有时, 因装拆还会对机件造成新的损伤和故障; 二是对机器在发生不正常磨

损时，不能及时预报，不能事先排除故障，因而造成了损失。因此，人们提出了根据现场工况监测结果，进行“预防损坏维修”制度或称“状态维修”（Condition maintenance）制度，即从机器设备的实际磨损状况出发，及时地、有针对性地进行维修，以提高机器设备的合理利用率，降低维修费用，提高经济效益。与此同时，人们还相应地发展了一些监控技术，如直观监控（如压力、流量、外观、间隙、相对位置等参数检测）、功能监控（如力、速度、功率、温升等参数检测）、振动监控和磨损微粒监控等。其中对润滑油中磨损微粒监控，往往更易抓住机件磨损的本质。因为磨损微粒的类型、尺寸、成分、形貌特征等，更能反映不同磨损形式的特征形态、磨损机理和机器的工况，因而越来越为人们所重视。

国外对机器设备的监测、诊断和故障分析的研究，是从飞机、舰艇和其它特种机械的发动机开始的。对润滑油中磨损微粒的监测分析主要有磁塞检测法、光谱分析法和放射性同位素检测法等。采用光谱分析法，可根据各元素所发射特征光谱线的强度，准确确定润滑油中各种金属元素的含量，分析速度快，故能对运转中的机器零件磨损状态进行监测，预报机械设备的磨损状态。但光谱分析检测磨损微粒的有效尺寸范围是在 $0.1\mu\text{m}$ 到 $8\sim 10\mu\text{m}$ 之间，其中对大于 $2\mu\text{m}$ 的微粒，其检测效率就大为降低，而最能显示机器磨损特征的微粒尺寸是从几微米到几十微米；同时，光谱分析法不能反映磨损微粒的形态，也不能将微粒按尺寸大小排列。磁塞检测法能够有效地检测出上百微米甚至毫米级的粒子，若辅以监测过滤器，亦可收集滑动轴承、蜗轮等有色金属磨损微粒，使用方便。但是，这种方法难于进行定量分析；同时，

由于对十几微米、几十微米尺寸的磨损微粒不敏感，而当收集到一定数量的大微粒时，可能机器中某些零件已经损坏，早期损坏预报的可靠性较低。用放射性同位素法测量磨损的最大优点是灵敏度很高，适合于测量极微量的磨损。但使用该法时需采用安全措施，并仅限于实验室，不适宜在现场使用。

为了解决光谱分析法仅限于小尺寸微粒，磁塞检测法又限于大尺寸微粒的缺点，人们一直在探索新的检测方法。1970年美国麻省理工学院塞福特 (W. W. Seifert)、福克斯博罗 (Foxboro) 公司韦斯科特 (V. C. Westcott) 和英国斯科特 (D. Scott) 等提出用铁谱检测的设想，1971年由福克斯博罗公司研制出世界上第一台铁谱仪，1972年取得了专利权。最初，他们用铁谱技术分析机件及摩擦副表面的磨损微粒，以后又将它用到对机器运动状态的监测和诊断。以铁谱技术为主，再配合其它先进技术（如光谱分析、磁塞检测等），联合使用，互为补充，不仅可检测机器磨损微粒，对机器进行工况监控和损坏预报，提供失效信息，还可用于改进机器的设计、提高产品质量、润滑油及添加剂的性能评价和摩擦磨损机理的研究。近年来，铁谱技术还成功地用于生物医学工程，如检测人体内移植假肢关节的磨损状况、骨关节炎、关节和退化关节内骨髓里的磨损微粒情况等。铁谱技术在国民经济、国防建设的各个部门，如航空、航海、铁路、电站、汽车、拖拉机等的发动机以及诸如纺织、冶金、矿山、液压、机床、石油等机械设备，都已得到广泛的应用。

光谱分析、磁塞方法和铁谱技术磨损微粒尺寸检测的有效范围，如图1-1所示。

根据铁谱技术原理制成的仪器有分析、直读铁谱仪，“在

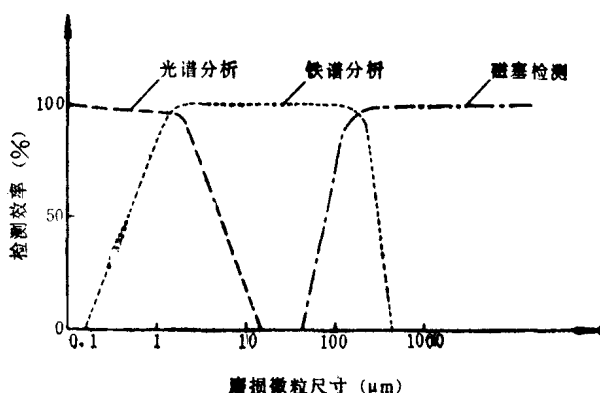


图1-1 三种检测技术效率与磨损微粒尺寸的关系示意图

线”铁谱仪和旋转铁谱仪等，1983年，世界铁谱仪的总数为166台，拥有铁谱仪的国家和地区为25个，其中美国拥有72台，占近半数，欧美、日本等技术发达国家，几乎集中了仪器总数的90%以上。

国际摩擦学组织对铁谱技术的发展十分重视，1982年9月在英国斯旺西（Swansea）专门召开了第一届世界铁谱技术研讨会，1984年4月又在英国斯旺西召开了以铁谱技术等为重点的国际磨损工况监控学术会议。几年来，该学会刊物（如《磨损》（Wear）杂志）除大量发表这一技术研究成果的论文外，还负责举办过多次世界性铁谱技术培训班，对这一技术进行推广和指导。

1977年，我国摩擦学代表团访问欧洲，将铁谱技术的信息带回国内。1979年，国内有少数单位开始进行铁谱仪器的研制工作〔2〕、〔3〕。1981年，我国引进了两台美国福克斯波罗公司生产的铁谱仪，开展了铁谱技术及其应用的研究。

1983年,国内正式生产铁谱仪。1984年召开的国际磨损工况监控会议上,我国代表发表了两篇有关应用铁谱技术进行工况监测与磨损失效分析的论文。1985年,国内已有几项以铁谱技术为主要内容的研究项目完成并通过了鉴定。1988年我国拥有铁谱仪的数量,已超过200台。国产的分析铁谱仪与直读铁谱仪在颗粒沉淀效率、重现性、线性度等三个主要性能方面,已接近或达到国外同类仪器水平〔4〕。1986年12月在杭州,1987年4月在武汉,先后两次召开了全国性的铁谱技术学术交流会议,1988年6月在北戴河召开的第二届全国机械设备故障诊断学术会议上,专门有一个铁谱技术组。铁谱技术在我国已引起了相当广泛的注意。国内已形成了一支由科研部门、高等院校和厂矿企业组成的研究和应用的技术力量。不仅在磨损机理的研究、油品性能分析方面,而且在发动机、液压系统、齿轮和轴承等的工况监测方面,都取得了相当成效。

与其它任何事物一样,铁谱技术不是完美无缺,它还有一些局限性:(1)铁谱技术基本是一种离线监测,即从现场取样,在实验室进行分析。这样周期较长,对发展很快的故障,或在一个取样周期内的突发性故障,铁谱技术的监测作用明显降低;(2)铁谱监测的成败首先取决于能否取得有代表性的油样,油样中的磨损微粒从 $0.1\mu\text{m}$ 到上百 μm ,尤其是较大尺寸的微粒,生成后极易沉淀,重现性差,因此,有时需反复试验、多次比较,才能取得有代表性的油样,这就给铁谱监测带来一些困难;(3)对于非磁性的有色金属磨损微粒,在铁谱仪中,其沉淀效率低,难以准确定量。若采用磁化液可使有色金属沉淀效率增加,但同时也沉淀了大量污染物,影响了监测效果;(4)铁谱技术发展历史较短,

涉及面广，影响因素较复杂，从取样、微粒分析直至状态判断，几乎都要依靠铁谱监测人员的技术与经验，人为因素较大，目前还难于依靠电子计算机和仪器本身的高度自动化，直观地、规范地处理，因而影响了它的准确性。

由于铁谱技术具有明显的特点，同时又有一些局限性，因此，它的作用曾引起了一些争论。但是，从众多的研究成果可以看出，铁谱技术，作为摩擦学基础研究的一种手段，作为机器状态监测和故障诊断的一种新技术，已越来越被有关科技人员和厂矿企业所接受。随着铁谱技术研究的深入发展和铁谱仪器的不断改进，铁谱技术逐步克服它的局限性、发挥它的特点，在科研和生产中，将日益起着重要的作用。

第二章 铁谱仪的工作原理与结构

铁谱技术的基本原理，是借助于磁场的作用，将磨损微粒从润滑油的试样里分离出来，并按照其尺寸大小，依次沉淀在玻璃基片（或玻璃管）上，然后根据这些磨损微粒的形态、大小、数量和成分等，对机器磨损工况进行分析判断。根据分离和检测磨损微粒不同方法制成的仪器有：分析铁谱仪（Analytical Ferrograph）、直读铁谱仪（Direct Reading Ferrograph）、“在线”铁谱仪（On-Line Ferrograph）、旋转铁谱仪（Rotary Particle Depositor）、由一台分析铁谱仪和一台直读铁谱仪并联而成的双联铁谱仪（Duplex Ferrograph）、由两台分析铁谱仪并列而成的复式铁谱仪（Dual Ferrograph）。此外，还有用于干磨损微粒的气动铁谱仪（Pneumatic Ferrograph）、采用磁场强度可调的电磁铁谱仪（Electromagnetic Ferrograph）等等。

一、分析铁谱仪

分析铁谱仪主要由五部分组成，即：抽取润滑油试样的微量泵、使磨损微粒磁沉积的磁场装置，供分析和观察用的玻璃铁谱基片、输送油样的特种胶管（输送管）和支架等。这一仪器是专供制备铁谱片用的。图2-1是分析铁谱仪的结构示意图。

低稳定速率的微量泵（亦称蠕动泵）将油样输送到磁场装置上方的玻璃基片的上端，由于玻璃基片安装成与水平面

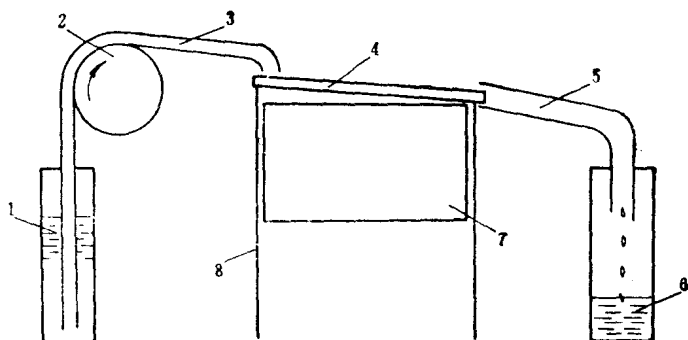


图2-1 分析铁谱仪结构示意图

- 1—油样 2—微量泵 3—特种胶管 4—玻璃基片 5—导流管
6—储油杯 7—磁场装置 8—支架

有一约 $1^{\circ} \sim 3^{\circ}$ 的微小倾角（此倾角称“基片倾角”，目前国际通用参数为 1° ，使沿油样流动方向造成一强大的磁场梯度），这样使润滑油试样出口端的磁场比入口端强。油样以每小时约15m的速度沿倾斜的玻璃基片向下流动，通过导流管，排入储油杯。

磁场装置一般是用两块磁铁材料和三块可充磁的纯铁组成（图2-2），两磁极间狭缝间隙（气隙）约 $1 \sim 2 \text{ mm}$ ，磁铁表面上磁通强度高达 1.8 T ，在两磁极尖部间的气隙中形成一个带有垂直分量的高梯度磁场。玻璃基片位于沿长度方向中心线的气隙的中央。磁力线方向由左磁极到右磁极（见图2-4。在图2-2中“ $\circ$ ”号表示磁场方向从纸面垂直向上，“ $\times$ ”号表示磁场方向由纸面垂直向下）。油样沿玻璃基片中的栅栏向下流动，通过一个逐渐增强的磁场，磨损微粒在连续增高的磁场力作用下被磁化。大微粒首先在入口端沉积，最小微粒通常在出口端附近位置上沉积（图2-3）。

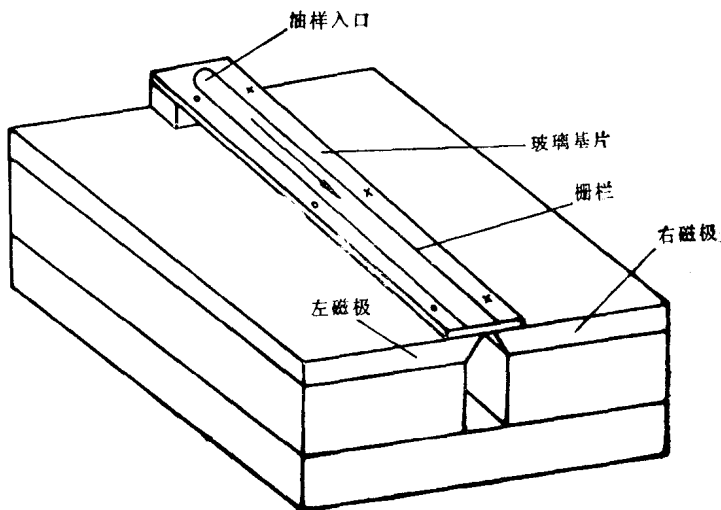


图2-2 磁场装置简图

在磁场作用下，磨损微粒之间的 S 极与 N 极相互吸引，它们垂直于油样流动方向排列成链状，而已经排列成链状的微粒与在其上方继续沉积并排成链状的微粒将会相互排斥而分开，故链与链之间保持一定的距离。

通常抽取约2 mL的油样，在玻璃基片上流过，用四氟乙烯溶剂冲洗底片上的残余油液，再用固定液使微粒牢固地贴附在玻璃基片上，玻璃基片的厚度约0.17 mm，这种含有排列成链状的磨损微粒的玻璃基片，称为“铁谱片”。通过测量铁谱片不同位置处的光密度，便可很快估计出磨损微粒的分布密度。由于铁谱片需在光密度计下测量磨损微粒的覆盖面积，并在光学显微镜和扫描电子显微镜下观察与分析磨损微粒的形态、大小、数量和成分，故对玻璃基片的纯度、

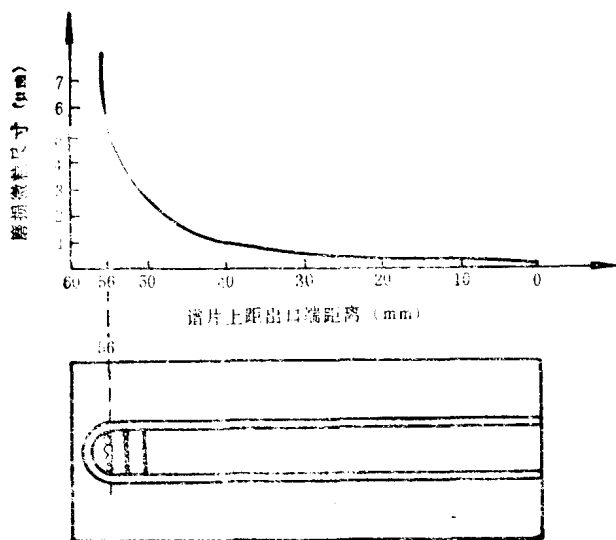


图2-3 铁谱片上微粒尺寸分布示意图

均匀度及表面清洁度等都有一定要求。另外，在玻璃基片中央用聚四氟乙烯围成一环形栅栏，保证油样在栅栏内流过而不致溢出。

分析铁谱仪的核心是磁场装置，要在1 mm 多的磁铁副尖部气隙内产生高度集中的强磁场，又必须有很大的磁场梯度，使几 μm 至几十 μm 大小的微粒从油样中沉淀出来，这除在磁极材料加以保证外，尖部形状、尺寸、气隙宽度等是决定作用在微粒上的力的很重要的因素。

磨损微粒在其随油样流过铁谱片受磁场作用而发生沉积过程中，同时受到重力、浮力、磁场力和油样粘滞阻力的作用。其中磁场力 F 影响最大，其大小为：