



磨粒分析

——磨粒图谱与铁谱技术

杨其明 著

中国铁道出版社

MOLI FENXI

MOLI TUPU YU TIEPU JISHU

责任编辑 聂清立

封面设计 冯龙彬

ISBN 7-113-04536-7



9 787113 045364 >

ISBN 7-113-04536-7/T·23

定 价： 80.00 元

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

磨粒分析——磨粒图谱与铁谱技术

杨其明 著

中国铁道出版社

2002年·北京

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

本书以大量科学试验和工业应用经验为基础,系统展示了具有热工机械特点的柴油机在不同磨损阶段所产生的各种典型磨粒的照片,并对其形态特征和产生机理进行了阐述。本书全面论述了铁谱技术的基本原理、操作步骤、相关技术、应用方法和发展前景。全书兼顾技术内容的理论性和实践性,图例分析的特殊性和一般性,是一本实用性很强的专著。

本书对掌握磨粒识别方法和应用铁谱技术有指导作用,对进行磨损机理研究和机器状态监测具有参考价值。

本书可供从事机械设备诊断工程技术研究和应用的人员使用,也可作为高等院校有关专业师生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

磨粒分析:磨粒图谱与铁谱技术/杨其明著. —北京:中国铁道出版社,2002.4

ISBN 7-113-04536-7

I. 磨… II. 杨… III. 柴油机-摩擦副-磨粒-磨损-分析-图谱 IV. TK421

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 008586 号

书 名:磨粒分析——磨粒图谱与铁谱技术

作 者:杨其明

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)

策划编辑:聂清立

责任编辑:聂清立

版式设计:马 丽

封面设计:冯龙彬

印 刷:中国铁道出版社印刷厂

开 本:889×1194 1/16 印张:11.5 字数:357 千

版 本:2002年8月第1版 2002年8月第1次印刷

印 数:1~2 000 册

书 号:ISBN 7-113-04536-7/T·23

定 价:80.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

序

人类关于磨损的认识可以追溯到公元前卢克里蒂斯(公元前 95—55 年)的论述。他指出:“……手指不断摩擦会使戒指磨薄。滴水会穿石成孔。犁头即使是铁的,在犁沟时也会逐渐磨小。我们看到,道路的路石因受行人的践踏而被磨光。城门的青铜雕像表明,其右手因受过路旅客的抚摸而被磨薄。我们看到,它们都因磨损而在变小。但是我们见识浅薄,希望今后有能力去了解在任一时期内什么部分被磨损掉。”由此可见,人们从很早开始就希望建立一种检测磨损发生和发展的手段。而本书阐述的基于铁谱技术的磨粒分析和磨损状态识别技术就是适应这一需要,达到了了解在一定时期内机械装备内部的磨损形态和部位的目的。

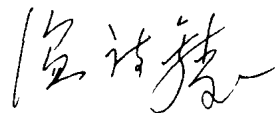
各种机械装备由于磨损引起的早期失效和报废,乃至重大事故所导致能源和材料损耗十分惊人。因此建立机械装备磨损状态监测和故障诊断技术具有重大的经济和社会效益。其中,铁谱技术提供了一种有效的手段,即通过磨粒分析来判断机械的运行状态和预报故障,因而得到广泛应用。

本书作者是我国率先从事铁谱技术研究人员之一。在 20 世纪 80 年代初期研制成功铁谱仪,并应用于实际,取得突破性进展。此后,作者以内燃机车柴油机为对象,长期从事铁谱技术在工况监测和故障诊断中的研究,积累了大量的资料和丰富的经验。可以说此书是作者近 20 年研究工作的总结。书中取材于大量来自作者亲身进行科学试验的典型磨粒图谱和实践经验,资源丰富,代表性强。虽然是出自对铁路内燃机车柴油机的工况监测研究,但对于其他行业的内燃动力机械,甚至其他机械的摩擦副也有参考价值,这是本书显著的特点之一。

作者在本书中不仅介绍了铁谱技术,包括它的工作原理和方法,而且还以润滑油中所含磨损颗粒为研究对象,较系统地阐述了它们的存在形式、产生机理、形态特征、辨识方法及其与摩擦状态间的相关性。这种将磨粒分析理论与相关检测技术相互结合的阐述,不但有利于在大型机械工况监测应用中提高运用磨粒分析方法的科学性和可操作性,而且丰富了摩擦学理论与实践的知识库。

本书阐述系统而清晰,在介绍各种分析方法时做到深入浅出,对现场工作人员的操作具有指导作用。同时,它对相关理论的论述点面兼容,并有启发性,是一本实践性很强而又有相当理论深度的著作。期望它的出版能得到厂矿企业、科研机构、高等院校从事第一线工作的广大读者的欢迎。相信这本书在推动摩擦学研究,发展我国机械设备状态监测和故障诊断技术方面,发挥出它应有的作用。

清华大学教授
中国科学院院士



2001 年 10 月 12 日

前言

随着现代化工业的高度发展,如何保障机械设备安全运行、减少故障停机事故、降低维修成本,已成为刻不容缓的课题,摆在直接从事生产实践的工程师们和从事相关理论研究的教授们面前。20世纪60年代,由美国宇航局(NASA)发起,成立了第一个国际性的机械故障诊断专业协会——机械故障预防组织(MFPG——Mechanical Failures Prevention Group),以研究、交流、总结、开发机械故障诊断技术。经过几届年会的成功举行,这个组织把当时已有的诊断技术划分为热工参数测量、振动监测和油分析三大领域。时至今日,现代科学技术的飞速发展,特别是计算机技术的广泛应用,已使工程师们手中逐渐拥有了更多的机械故障诊断手段,所涉及技术范围之广,远远超出这三个领域字面上的含义。但油分析技术仍以它独特的优势,成为人们更加青睐和倾力发展的有效方法。

油分析技术(Oil Analysis)的起源,可以追溯到20世纪40年代。为了满足空军机群高可靠性飞行的需要,美国首先将原用于分析液体或固态样品元素组成的光谱技术,移植到对机械润滑油中所含微量磨损元素的测定上来。通过测量油中以不溶物形式存在的磨损微粒——磨粒(Wear Particle)的含量,判断与产生这些磨粒相关摩擦副的工作状态。这种方法在美国空军、铁路以及其后在英国、前苏联铁路的成功运用,使油分析技术得以肯定,并“约定俗成”赋予这一名词以新的技术内涵。到了20世纪70年代,铁谱技术(Ferrography)的问世,使油分析技术如虎添翼。因为自从有了铁谱技术之后,诊断工程师们不但可以获知油中或其他液体工作介质中机械磨损产物是否超限存在和存在总量的多少,而且还可直接观察到它作为一个磨粒群体存在的形式和组成这个群体的每个单体存在的形态。由此,磨粒分析技术(Wear Particle Analysis)应运而生。游弋在成千上万个多姿多彩的磨损微粒微观大千世界之中,去采集丰富的信息和探索机械磨损规律,这种描述可以说是对磨粒分析技术的一种形象的比喻。

迄今,油分析技术已经组成一个大的家族。这其中既包括光谱技术、铁谱技术、颗粒计数技术、红外谱技术、气相色谱技术等以油液中磨(微)粒为信息载体的分析技术;也包括对诸如粘度、闪点、总酸(碱)值、水分、机械杂质等油液自身理化性能的测试技术等等。我国在这个领域的研究与开发工作近年来已有长足进步。目前不但与西方工业发达国家在技术水平上旗鼓相当,而且令人瞩目地取得工业应用的显著经济效益。油分析技术已在摩擦学理论界和设备诊断工程界占有重要的一席之地。它在大型机器状态监测(Condition Monitoring)中独树一帜的成功应用,初步形成了油液监测(Oil Monitoring)这一具有交叉专业特点的新的工程技术范畴。

然而,与突飞猛进的仪器硬件装备的不断改进相比,作为磨粒分析依据之一的磨粒图谱,其研究和开发工作就略显单薄而极不适应它应有的重要地位了。本书试图在总结多年铁谱仪研制和将其应用于铁路内燃机车状态监测所取得的经验之基础上,向读者展示产生于柴油机不同磨损期的典型磨粒、描述其形貌特征、介绍其识别方法、说明其产生机理、对照其相应的机器状态。这些典型磨粒的铁谱照片,源自于对229台机车和其他设备的监测,选自1600余个油样的铁谱分析和2500余张显微拍摄。书中还全面系统地介绍了作为磨粒获取和分析手段

的铁谱技术之基本理论、仪器结构、操作方法和最新发展。众所周知,柴油机是摩擦副种类较多、结构复杂、工况恶劣的热工机械。在高温、高压、高速工况条件下产生的磨粒,既有特殊性又有代表性。可以说,以此为主要内容的磨粒图谱,对把握磨粒特征和识别方法具有普遍意义。

应该指出的是:磨粒图谱的编制是一个过程;一个伴随磨粒分析技术不断发展的过程;一个磨粒典型不断丰富、识别方法不断提高、理论阐述不断深入的过程。这个时间过程,为我们开辟了一个进行以下三个方面的相关理论研究、相关技术开发的空间。首先是磨粒分析方法在更多工业领域的应用研究,它在数量和种类上提供更丰富的典型磨粒的资源。第二是摩擦学磨损理论的深入研究,它为磨粒生成的机理做出更为科学的解释。第三是计算机图形识别技术的研究,它将为磨粒特征做出量化的描述,甚至带来磨粒识别方法的根本变革。可以预料,在今后相当一段时间内,磨粒分析技术的研究与应用,仍是工业摩擦学和设备诊断工程领域中的前沿课题。人们期望更全面地掌握磨粒图谱资源、更有效地应用磨粒分析技术,从而创造更高的经济效益。

本书素材大部分取自作者研究成果。在此,向合作多年的北京铁路局北京科研所和机务处的同行们表示感谢。在成书过程中,多蒙温诗铸院士、谢友柏院士等前辈指教,谨致以谢意和敬意。由于本人水平有限,书中难免谬误之处,敬请读者指正。

作者
2001.12



杨其明，教授级高级工程师。

1946年2月出生，1969年毕业于北京大学物理系。现任铁道部北京铁路局北京科研所所长，中国机械工程学会摩擦学会理事，中国振动工程学会故障诊断学会常务理事。长期从事工业摩擦学、机械设备故障诊断领域的研究工作。主持我国第一台分析式和直读式铁谱仪的研制，已在我国铁路机车工业、机务检修、大修机械等部门和全国机械、冶金、石油、化工、交通、民航、军事等行业推广应用并进入国际市场，产生显著经济效益。各项研发和应用成果获铁道部科技进步奖和国家、北京市各级奖励。发表多篇论文，曾在美国、英国、瑞士等地召开的国际会议上宣读并获奖。获国家级有突出贡献中青年科技专家、全国铁路优秀知识分子等称号。享受国务院颁发政府特殊津贴。

目 录

第1章 概 论	1
1.1 磨粒图谱与铁谱技术	1
1.2 磨粒图谱的编制	3
1.2.1 铁谱片上的磨粒	3
1.2.2 基于磨粒识别分类的图谱编制方法	3
1.2.3 基于机器摩擦副磨损过程的图谱编制方法	4
1.3 磨粒图谱和信息技术	5
第2章 内燃机车柴油机磨粒图谱	7
2.1 磨合期的典型磨粒	11
2.2 正常磨损期的典型磨粒	27
2.3 异常磨损期的典型磨粒	38
2.4 监测实例	75
第3章 铁谱仪及其原理	91
3.1 铁谱仪中的磁场	91
3.1.1 高梯度强磁场	91
3.1.2 高梯度强磁场的形成	92
3.1.3 磨粒的磁性特征	93
3.2 分析式铁谱仪	94
3.2.1 分析式铁谱仪的工作原理	94
3.2.2 磨粒在铁谱片上的沉积规律	95
3.2.3 分析式铁谱仪的技术参数	97
3.3 直读式铁谱仪	98
3.3.1 直读式铁谱仪的工作原理	98
3.3.2 磨粒在沉积管中的沉积规律	98
3.3.3 直读式铁谱仪的技术参数	101
3.4 其他种类的铁谱仪	102
3.4.1 旋转式铁谱仪	102
3.4.2 在线式铁谱仪	103
第4章 样品的采集与处理	106
4.1 润滑系统中的磨粒浓度平衡	106
4.2 取样周期、部位、方法和用具	109
4.2.1 取样周期	109
4.2.2 取样部位、方法和用具	110
4.3 补油和换油的影响	111
4.4 润滑脂取样	113
4.5 油样的处理和稀释	114
4.5.1 油样的处理	114
4.5.2 油样的稀释	115

第5章 铁谱仪的操作	117
5.1 铁谱片的制取和直读数的测读	117
5.2 铁谱显微镜的操作	118
5.2.1 铁谱显微镜成像系统的基本部件	118
5.2.2 铁谱显微镜照明系统的基本运用	124
第6章 磨粒的识别技术	128
6.1 摩擦学基本概念	128
6.1.1 相对运动中相互作用的表面	128
6.1.2 摩擦、磨损、润滑及其分类	130
6.1.3 几种主要的磨损机理	131
6.2 磨粒的分类与识别	135
6.2.1 磨粒与磨损	135
6.2.2 磨粒识别特征与形成机理	135
6.3 铁谱片加热分析法	137
6.3.1 铁谱片加热分析法的原理	137
6.3.2 铁谱片加热分析法的操作	138
6.4 扫描电子显微镜技术的应用	139
6.4.1 工作原理和特点	139
6.4.2 应用程序	140
第7章 磨粒的定量分析方法	142
7.1 润滑油中磨粒的存在形式	142
7.2 基于磨粒总体数量的定量分析方法	144
7.2.1 定量判据选择	145
7.2.2 定量趋势分析	145
7.3 基于磨粒粒度分布的定量分析方法	151
7.3.1 图像分析系统	151
7.3.2 粒度分布函数特征参数	152
第8章 磨粒分析与信息技术	154
8.1 磨粒信息管理系统	154
8.2 磨粒自动识别技术	157
8.2.1 磨粒自动识别系统的组成	157
8.2.2 描述磨粒各种特征的参数	158
8.2.3 磨粒自动识别技术的方法	160
8.3 磨粒分析监测系统	162
8.4 油液监测信息融合	162
附录 名词术语(中英文对照)	166
主要参考文献	170

第1章 概 论

1.1 磨粒图谱与铁谱技术

磨粒图谱(Wear Particle Atlas)是汇集了大量在各种不同机械磨损形式下所产生的典型磨损颗粒和其他产物的图像,以供科学研究和工程技术人员开展磨粒分析的参照依据。它的出现和发展与铁谱技术(Ferrography)的问世和广泛应用密不可分。

机械的摩擦、磨损和润滑是极为普遍的自然和工程现象,也是十分重要的古老和现代课题。1970年,美国麻省理工学院(MIT)的W.W.Seifert和超音公司(Trans-sonic Inc)的V.C.Westcott开始合作探索一种新的机械磨损观测方法,并在1972年取得成功。这项成果在《Wear》期刊上面世,被命名为Ferrography。经过20余年的发展,中国同行将其译为“铁谱技术”的译法已得到公认。铁谱技术的原理是:利用高梯度强磁场将机械润滑剂或工作介质中所含产生于磨损或其他机理的微粒按其粒度大小依序分离出来,并通过对微粒形态、大小、成分以及粒度分布等的定性和定量观测,获得有关摩擦副和润滑系统等工作状态的重要信息。1976年,美国福克斯伯罗公司(Foxboro Company)以此成果为基础生产的分析式铁谱仪(Analytical Ferrograph)开始供应市场。此后不久,该公司又开发了直读式铁谱仪(Direct Reading Ferrograph)。几乎是同时,作为使用该仪器必不可少的参照标准,第一卷磨粒图谱也由V.C.Westcott编撰成集,作为仪器销售的附件,供应用户。随着铁谱技术在英国、美国、挪威等工业发达国家科学研究和工程技术特别是国防军事领域的迅速推广应用,更多的典型磨粒得以发现和积累。1982年,由设立在美国新泽西州的美国海空工程中心(The Naval Air Engineering Center, Lakehurst, New Jersey, USA)发起,编制了《磨粒图谱(修订版)》[Wear Particle Atlas(Revised)]。与第一卷有所不同的是,它在钢与钢对磨所产生磨粒图谱的基础上,增加了有色金属磨粒和金属氧化物及污染物等。由于它涵盖了更多种类的磨粒,所以更具有参考价值。此图谱已经译成中文由机械工业出版社于1987年出版。虽然该图谱主要源自美国空军将铁谱技术应用于航空燃气轮机监测的经验,有一定的局限性,但它几乎是任何一位起步开展铁谱技术研究和应用的科技人员的必读启蒙课本。延用至今,价值不贬。从这一历史角度足见磨粒图谱在铁谱技术乃至一切涉及磨粒分析方法的技术中之重要位置。

铁谱技术的出现引起国内同行的关注。20世纪70年代后期,我国科技工作者便在没有任何技术引进背景下独立开始铁谱技术的研究工作。1977、1979两年间,中国机械工程学会赴德、英摩擦学考察团分别在其考察报告中向国内介绍了这一新技术。1979年,我国铁路系统以最终实现内燃机车柴油机工况监测和故障诊断为目标,立项开始研制铁谱仪。1981年,仪器的研制和初步应用取得突破性进展。1982年,我国第一篇有关铁谱技术的论文在英国召开的首届国际铁谱学术会议上宣读,受到铁谱技术发明人和国际同行的极高评价。1983年,国产分析式铁谱仪通过技术鉴定,达到国外同类产品水平。1985年,中国的直读式铁谱仪也研制成功。由于铁谱技术具有其他同类技术所不具备的优势,故得以迅速开发和推广。经过近20年的发展,目前我国拥有进口和国产铁谱仪的单位已超过500家。其分布遍及机械、铁路、交通、石化、冶金、煤炭、航空、国防、教育等部门的科研机构、高等院校和厂矿企业。国产铁谱仪也曾出口澳大利亚、加拿大、越南等国,走向国际市场。

值得注意的是:在各行业、各领域、各学科所进行的铁谱技术开发研究和推广应用工作中,无一不把获取、选择、分类、积累、编撰本研究对象的磨粒图谱作为重要工作目标之一。这是因为它对铁谱技术的应用起着指导性的作用。例如,铁路、交通部门针对机车和船舶动力系统的工况监测,编制了柴油机磨粒图谱;采矿、施工行业针对矿山和工程机械传动系统的工况监测,编制了齿轮系统的磨粒图谱;冶金钢铁制造业针对轧机轴系的监测,编制了大型滑动轴承的磨粒图谱等等。这些图谱,如同上文提到的《Wear Particle Atlas

(Revised)》一样,第一次把五彩缤纷的各种机械磨损产物之微观大千世界展现在世人面前。其信息之丰富、形态之直观、特征之鲜明、利用之有效,不但是铁谱技术发明者所始料不及,而且令所有涉足这一领域的科技工作者们赞叹不已和应接不暇。对这一新的信息资源的充分利用,使铁谱技术在磨粒分析方面处在其他磨损测试技术所不能替代的位置。

正是因为铁谱技术在获取磨粒图像上具有优势,所以在其问世后 20 余年中,它在科学研究和工程技术这两个方向上得以迅速发展和应用。首先它为摩擦学(Tribology)的理论研究提供了又一种科学、先进的观测方法。摩擦学是研究在相对运动中相互作用着的表面的科学和技术。它的研究对象是工程表面的摩擦、润滑和磨损。其目的是详细了解工程表面的相互作用,而后提出工程应用中的改进办法。因此,摩擦学理论的研究有着悠久的历史渊源和重要的现实意义。然而,虽然其中有关在各种润滑状态下的摩擦理论研究比较系统和丰厚,但相对而言,有关磨损机理的研究就较为孤立和单薄。传统的粘着磨损理论一直作为滑动磨损机理的理论支持,但仍不能理想地解释各种条件下的试验结果和工程现象。究其根源,磨损测试手段的不足是重要原因之一。铁谱技术中的磨粒获取和分析,为推动磨损理论的研究提供了新的途径。摩擦学工作者从此由单一依赖于磨损表面测试方法进步到综合运用磨损表面测试和磨损产物观测这两种手段。由 V.C. Westcott 编制的第一卷磨粒图谱表明,钢与钢对磨正常磨损产生的磨粒应具有粒度为数微米、长短轴之比不大于 5、厚度不超过 $1\text{ }\mu\text{m}$ 、表面光亮、边缘圆滑的特征。这一点显然无法用粘着理论做出圆满解释。粘着理论认为机械表面的磨损源自摩擦相对表面微凸起在载荷作用下相互接触产生高温而粘着脱落。按照这种理论解释,所产生的磨粒应是块状而不是如上所述的片状。然而,磨粒的直接观察结果却有力地支持了另一种新的磨损理论,即美国麻省理工学院的 N.P. Suh 等人于 1973 年前提出的“剥层理论”。磨粒的观测还与 G. Bielby 于 1921 年提出的金属表面层结构理论相吻合。他认为在摩擦副机械加工表面的滑动摩擦磨合期中,会形成一个厚度仅有 $1\text{ }\mu\text{m}$ 左右、具有塑性流动变形特征的光滑短晶格序的切混层(Shear-mixed Layer)。后人又称此表面层为毕氏层(Bielby-Layer)。据此,对滑动正常磨损就有了一种新的剥层理论解释。即:正常滑动磨损就是摩擦表面切混层不断剥落、生成和再剥落的过程。除此之外,运用铁谱技术和磨粒分析方法所进行的诸如弹性流体润滑、边界润滑、滚动疲劳磨损等各种摩擦学状态下的磨损机理研究也都取得成果。这些成果也部分地应用于摩擦副产品如轴承、齿轮的设计。与此同时,磨粒对摩擦副摩擦学状态的反作用已经受到极大的关注。它不但有可能造成人们所熟知的极具破坏性的三体磨粒磨损,而且有实验和研究表明,它的存在形式与摩擦副的摩擦、润滑状态之间有着规律性的关系。在现代摩擦学的研究中,磨粒已经成为一个摩擦学系统中不可忽略的组成部分。正因为磨粒扮演着摩擦学系统中的重要角色以及磨粒分析为摩擦学的发展独辟新径,原英国国家工程实验室(NEL)冶金部主任、《Wear》主编 D. Scott 提出建立新的理论——“微粒摩擦学”(Particle Tribology)。

其次,铁谱技术在工程应用方面,也为产业部门大型机械设备的工况监测和故障诊断提供了又一实用有效的工具。由它所获取的数字型的信息,也就是磨粒浓度值,可以回答设备“磨损是否异常”的问题。而所获取的图像型的信息,即磨粒分析的结果,可以回答设备“异常磨损来自何处、出自何因、属于何类”等深层问题。二者结合,成为铁谱技术得以在工矿企业迅速推广应用的优点。1992 年,由全国铁谱技术委员会主持完成的对我国 98 个应用铁谱技术单位的抽样调查表明:用于磨损机理研究的单位占 22.7%;用于油品性能评价的占 23.8%;用于产品质量控制的占 3.5%;用于机械监测和故障诊断的占 44.8%。可以说用于工业运用的单位占绝大多数。就设备配属而言,这 98 个单位共拥有铁谱仪 168 台套。其中由生产企业占有的为 41.0%;由研究院所和高等院校占有的为 24.0%。由此可见,无论是铁谱仪的占有量还是铁谱技术的应用方向都说明我国铁谱技术的应用主导地位是它的生产应用。据 1985 年到 1992 年的不完全统计,这 98 个单位中的 48 个工矿企业运用铁谱技术增产 3 815 万元;节支 8 451 万元,直接经济效益约 1.226 亿元。我国铁路已在机务系统和机车工业系统全面推广铁谱技术。所有的内燃机车架修机务段和内燃机车制造厂全部配置了铁谱仪。生产我国铁路主型内燃机车东风₄型内燃机车的大连机车车辆厂采用铁谱技术修订和调整了柴油机磨合规范,合理地缩短了出厂磨合时间,提高了磨合台位的使用效率,每年直接经济效益可达 105 万元。柳州铁路局柳州、金城江两机务段在对运用中的东风型和东风₄型内燃机车柴油机进行工况监测中,推广应用铁谱技术。在 1989 年至 1991 年间成功预报柴油机故障,防止机破事故,直接经济效益 48 万元。绝

大多数的内燃机务段和部分电力机务段都已经把铁谱监测纳入日常的机车运用或检修程序,成为保障机车安全运行的重要手段。

不仅是在机械工程领域,铁谱技术在其他诸如生物工程、环境工程等领域中也发挥了它独特的作用。利用铁谱技术中特有的磁化方法,可以将人类膝关节骨液中的游离物分离出来并排列在铁谱片上。通过对游离物的观察分析,做出关节炎的早期诊断。用同样的方法进行对人造关节产生磨粒形貌的研究,可以对其性能做出评价。近年来,甚至出现了用铁谱分析方法快速检查环境中细菌存在和对其计数的研究成果报告。由此,也就有了“生物铁谱”(Bio-Ferrography)的说法。铁谱技术发明人之一 V.C. Westcott 自 20 世纪 90 年代中期起便创建了专门的研究所,以致力开发生物工程领域中的铁谱技术。

实践证明,铁谱技术不但在科学研究上有着明显的技术价值,而且在生产实践上有着广泛的应用前景。磨粒图谱作为它的主要技术内容之一,其编制具有重要的技术意义。

1.2 磨粒图谱的编制

1.2.1 铁谱片上的磨粒

如上节所述,磨粒图谱中的典型磨粒图像均采用铁谱技术获得。分析式铁谱仪将油样中的各种磨粒依序沉积在一个特制的玻璃铁谱基片(Ferrogram Slide)上。经过固定剂(Fixer)的处理,制成铁谱片(Ferrogram),如图 1—1 所示。铁谱片长度 60 mm,宽度 24 mm,厚度 0.12~0.17 mm。为了标示磨粒沉积的位置,以油样流出铁谱基片的端边为坐标原点,则油样开始进入铁谱基片的落点为 55~56 mm,称之为入口区(Entry Region)。铁谱仪中高梯度强磁场的磁力线与油流动方向垂直,因此,油样中的铁磁性磨粒沿磁力线方向沉积排列成相互平行但垂直于铁谱片长轴方向的链状,称之为沉积链(Deposition Strings)。铁谱基片与磁铁平面成一恰当角度放置。试验油样在不浸润的限流带(Non-wetting Barrier)间流经磁场时,其中的磨粒便依其大小先后沉积在铁谱基片上。入口区沉积大于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的磨粒,50 mm 处沉积 $1\sim 2\text{ }\mu\text{m}$ 的磨粒,50 mm 以下的区域便是亚微米级的磨粒了。对磨粒的观测和记录,一般采用专用的光学显微镜(Optical Microscope),即铁谱显微镜(Ferroscope)。它的特点是具有反射和透射可同时照明的系统和多种照明方式,其金相物镜的分辨率要达到亚微米级。为了能够更清晰地观测和进行磨粒元素组成成分分析,还可以应用扫描电子显微镜(SEM)技术和与之配套的能谱分析系统(EDAX)。这种分析设备成本很高,但能获得焦深极长、立体感很强的磨粒照片和准确的磨粒成分结果以及各成分元素的线分布或面分布图。它是识别未知磨粒成分的重要手段,但它不能区分颗粒是否为透明和辨别颜色,因此应与铁谱显微镜配合使用。有关铁谱仪和铁谱显微镜的原理、结构和操作方法,将在本书第 3 章中加以详细介绍。而第 2 章在描述图谱中的磨粒时,会用到本节的知识 and 符号。

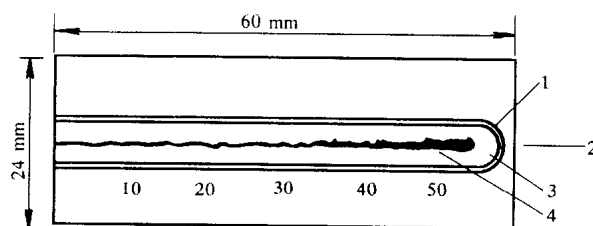


图 1—1 铁谱片

1—限流带;2—油流;3—入口区;4—沉积磨粒带。

1.2.2 基于磨粒识别分类的图谱编制方法

这种编制方法是以磨粒识别为主线。它的层次可概括为:磨粒分类→磨粒成分→磨粒形态特征→磨粒形成机理。上文提到的由英、美学者及工程师编制的《磨粒图谱(修订版)》即采用了这种编制方法(见图 1—2)。应该说明的有以下几点:

1. 在铁谱技术及磨粒分析技术中,各种磨粒的命名,或者取其形态特征,如“切削磨粒”、“球形磨粒”;或者取其成分特征,如“红色氧化物”、“摩擦聚合物”;或者取其产生机理,如“疲劳剥块”、“腐蚀磨损颗粒”等等。虽然不够规范,但均取自其特征的区分,多年使用已经得到同行公认并自成一系,统一运用。关于各种磨粒的识别与界定方法将在本书第 6 章予以阐述。

2. 由于在机器的摩擦副中常以铁系合金材料为多,所以在建立磨粒特征和依此予以命名时,常以铁系磨粒为例。这容易引起一种误解,似乎只有钢与钢对磨才会产生“正常磨粒”、“严重滑动磨粒”……等等。实则不然。当摩擦副的一个表面是有色金属——如铜合金时,同样可以在铁谱片上发现铜材质的诸如“严重滑动磨粒”、“切削磨粒”等等。当然,有色金属与黑色(铁系)金属在材料的物理、化学、机械性质上有着明显的不同,也会出现无法套用铁系磨粒命名的情况,如铅/锡合金粒。所以,有色金属磨粒的命名,既有与铁系磨粒共同之点,也有独用之处。

3. 基于磨粒分类的图谱编制方法,是依据磨粒的识别特征,并以此为出发点对磨粒产生机理做出解释。因此这种编制方法具有基础性和标准性的特点,适用于通用型磨粒图谱的编制。

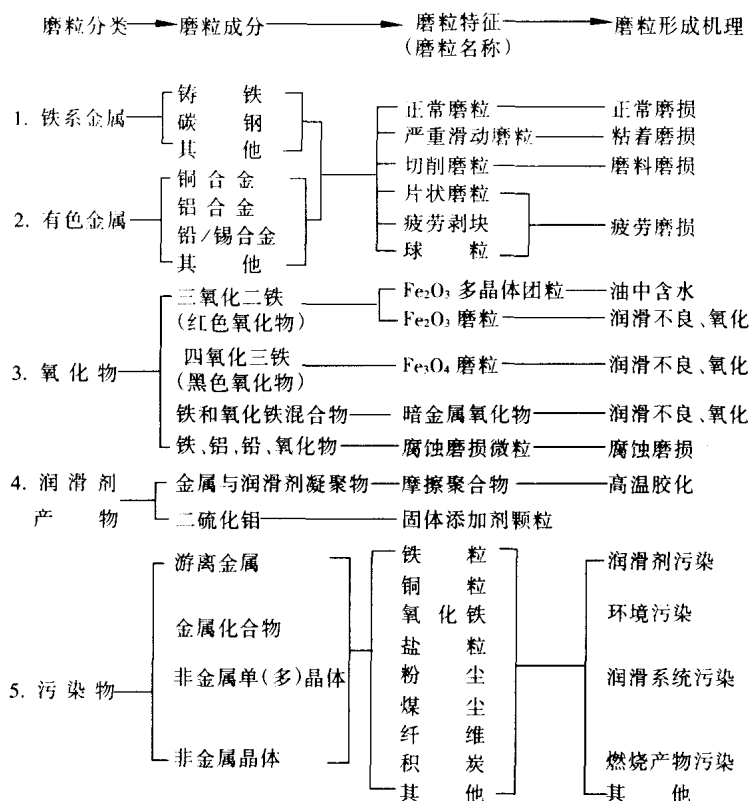


图 1—2 基于磨粒识别分类的图谱编制方法

1.2.3 基于机器摩擦副磨损过程的图谱编制方法

这种编制方法是以机器或零件摩擦副的磨损过程为主线。铁谱技术和磨粒分析方法的应用都要针对具体的工作对象。这既包括科学研究领域中对摩擦副材料的试验、机械零件摩擦学设计的验证、润滑剂性能的评定;也包括工程应用领域中对大型机器和零部件——比如内燃机、燃气轮机、轴承、齿轮的状态监测和故障诊断。按照一般规律,机器或零件的摩擦副在完成机加工和组装后,从开始投入运用到破坏都要经历三个磨损阶段。

即磨合阶段(Running-in Wear 或 Break-in Wear)、正常磨损阶段(Normal Wear)和异常磨损阶段(Abnormal Wear)。与这三个阶段相对应,所产生的磨粒数量和种类,会具有不同的特征。图 1—3 示出不同磨损阶段的“磨粒浓度—时间”关系曲线。与之相比较,图 1—4 示出磨损过程的理论曲线。两图中 A 区为磨合阶段;B 区为正常磨损阶段;C 区为异常磨损阶段。图 1—3(a)是采用光谱技术所

表 1—1 不同磨损期可能产生的磨粒种类

磨合期	正常磨损期	异常磨损期
磨合磨粒	正常磨粒	严重滑动磨粒
切削磨粒		疲劳磨粒
球形颗粒		切削磨粒
Fe ₂ O ₃ 团粒		Fe ₃ O ₄ 磨粒
其他		摩擦聚合物
		腐蚀磨损微粒
		污染物
		其他

得到的磨损元素浓度(ppm——百万分之一)与时间的关系曲线(ppm 是一个非标准的相对浓度单位,相应的标准计量单位是 $\mu\text{mol/L}$ 。但由于长期广为使用,所以惯用至今)。光谱仪的工作原理决定了它所测出的数

据是表征了润滑油中微米级及以下的小磨粒量的累积值,所以这条曲线与讨论磨损过程时常引用的“磨损量”曲线十分吻合(见图1—4(a))。图1—3(b)是采用铁谱技术所得到的磨粒浓度(D_L ——大磨粒浓度值)与时间的关系曲线。 D_L 是用直读数铁谱仪测出的“大磨粒直读铁谱数”,所表征的是润滑油中大于微米级的大磨粒浓度值。后面的章节将说明,带有滤清器的润滑系统,其中大磨粒的浓度所代表的是摩擦副的磨损(速)率。因此这条曲线与讨论磨损过程时常引用的磨损率“浴盆曲线”(见图1—4(b))十分接近。所不同的是,在零时刻它并未如“浴盆曲线”那样有一个A区的极大值。这个极大值要稍滞后出现。这是因为在一个有滤清器的润滑系统中,油内的磨粒浓度需要一段时间才能达到平衡。

与定量曲线相对应,在三个分界比较明显的不同磨损阶段,会产生形态、成分、大小各异的不同磨粒。表1—1列出了各阶段可能产生的磨粒类别。无论是定量曲线的特征还是磨粒种类的差异,都为基于机器摩擦副磨损过程编制磨粒图谱提供了可能。

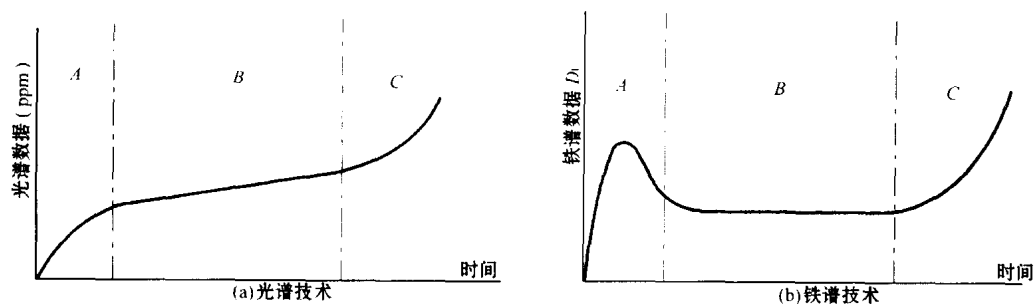


图1—3 不同磨损阶段的磨粒浓度曲线
A—磨合阶段;B—正常磨损阶段;C—异常磨损阶段。

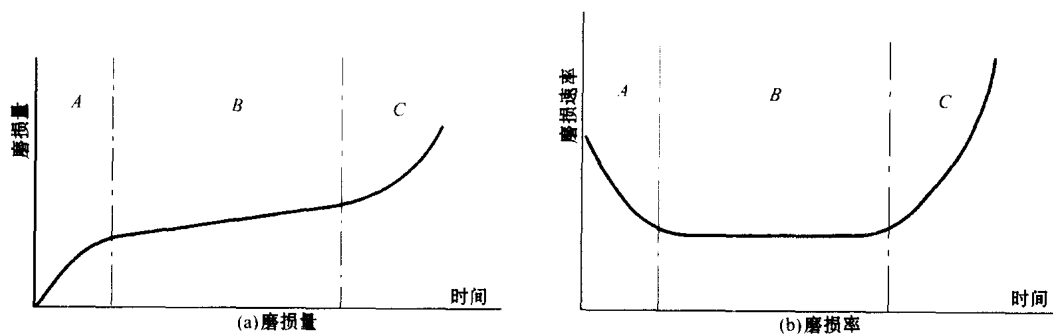


图1—4 不同磨损阶段的磨损曲线
A—磨合阶段;B—正常磨损阶段;C—异常磨损阶段。

比较两种不同的图谱编制方法,我们可以看到,前者以磨粒本身为对象,侧重于基本识别,带有基础性和通用性。后者以机器零件为对象,侧重于特征捕获,带有实用性和专业性。本图谱着眼于磨粒分析的工程应用,故采用后一种编制方法。但对于某些新发现磨粒,仍侧重于基本识别的描述。

1.3 磨粒图谱和信息技术

铁谱技术之所以具有生命力,皆得益于其不同于其他磨损测试技术,可以兼获数字和图形两种形式的信息。出于不断扩大和深入应用的需要,铁谱技术自身也需要运用现代信息技术不断在这两个方面加以改进和完善。一方面是对铁谱技术中数字形式的信息,寻求采用更能直接反映测试对象内在本质和规律的数学方法加以处理,得到能够区分正常和异常磨损的阈值,建立基于数字型信息的“监测标准”。已有的常用作法有:利用数理统计、线性或非线性回归、模糊判断、灰色判别、自适应建模等精确或非精确数学方法,在大量试验数据样本的基础上找出铁谱数据的监测值或动态监测曲线。而另一方面,则是对已知或未知的典型磨粒,解析和提炼出诸如形态的、色泽的、表面纹理的等各种可能获取的图像信息特征,以建立基于图像型信息的

“判别标准”,这就是磨粒图谱。

“图型”标准的建立要比“数型”标准的建立更为复杂和困难。这是因为面对信息量极大的图像,研究人员要综合利用机械学、冶金学、物理学、化学等知识和较长时间的实践经验,选择恰当的信息处理技术进行特征的提取乃至特征的量化。当前,有部分高等院校和科研院所作为一种前沿课题进行这方面的探索。这其中包括较为成熟的二维图形识别、边界曲线傅里叶变换、表面灰度切割、二维边界的一维曲线展开、边界展开线的小波分析等等。计算机网络技术的迅速发展和应用,为磨粒特征提取和自动识别提供了新的途径。这些研究工作一旦取得实质性的突破,将会给磨粒图谱的编制和应用带来质的飞跃。

可以说,磨粒图谱从其一出世,就进入了信息工程领域。它的发展是一个不断的信息获取、信息处理、信息确定、信息融合、信息积累、信息共享和信息运用的过程。这个过程显然与以下具体的信息技术进步相辅相成、相长相消。

1. 更新、更多的典型磨粒的发现和识别。
2. 高分辨率和高还原性能的光学或电子学微观成像系统的开发。
3. 图像分析数学方法和计算机图像智能识别技术的发展。
4. 能对各种条件下磨损现象做出更为科学和准确解释的摩擦学理论的进展。
5. 铁谱技术和磨粒分析方法在科学试验和生产实践中更加广泛的应用。
6. 信息处理、信息融合理论和算法的发展。

可以预计,随着信息技术的发展和科学试验、生产应用需求的扩大,磨粒图谱其内容涵盖将由单一对象走向多种行业;其文字说明将由定性描述走向数字量化;其出版形式将由图册书籍走向电子音像;其资源利用将由专业格局走向网络共享。

第2章 内燃机车柴油机磨粒图谱

本图谱编入的典型磨粒及有关照片,主要源自采用铁谱技术对 229 台东风_{4B}型、ND₅型和北京型内燃机车柴油机历时数年的状态监测。

三种型号内燃机车柴油机主要技术参数和主要摩擦副的材质见表 2—1。更为详细的技术内容可参见有关机车的技术专著。

表 2—1

车 型 技术参数、材质	东风 _{4B} 型内燃机车	ND ₅ 型内燃机车	北京型内燃机车
柴油机型号	16V240ZJB	7FDL-16	12V240ZJ
标定功率	2 650 kW	2 940 kW	1 990 kW
标定转速	1 000 r/min	/	1 100 r/min
最高转速	/	1 000 r/min	/
气 缸 套	合金铸铁	特种合金铸铁	特种合金铸铁
活 塞	薄壁球墨铸铁或锻铝;镀铬、锡	钢顶铝裙	铸 铝
活 塞 环	铸铁,喷钼镀锡或镀铬、锡	高强度可锻铸铁	合金铸铁
活 塞 销	合金渗碳钢	45 铬钼合金钢	12 镍铬合金钢
活塞销衬套	/	钢背青铜	/
活塞关节销衬	/	钢背青铜	/
曲 轴	稀上铜钼合金球墨铸铁或全纤维锻压合金钢	合金锻钢	全纤维锻压合金钢
主 轴 瓦	钢背 20 高锡铝合金镀锡或铅—锡层	钢背铜铅巴氏合金	钢背高锡铝合金
连 杆 瓦	钢背 20 高锡铝合金镀锡或铅—锡层	钢背铜铅巴氏合金	钢背高锡铝合金
止 推 环	铸造锡青铜镀锡或铅—锡层	钢	青 铜
凸 轮 轴	50 锰低淬透合金调质钢	合金锻钢	合 金 钢
凸轮轴承	钢背锡铋轴承合金	铝 合 金	青 铜

三种内燃机车柴油机的机油循环系统结构虽有所不同,但润滑方式基本相同。除对个别供油困难、相对运动速度较低、负荷较轻的机件采用人工添注润滑外,对各主要运动件、固定件摩擦副都是采用压力润滑和飞溅润滑两种方式。以东风_{4B}型内燃机车柴油机为例,对于如主轴承、连杆轴承、增压器轴承、凸轮轴轴承等高速、高负荷运动零部件均供应压力机油进行润滑;而对负荷较低、相对供油条件较好的摩擦副,如气缸套、凸轮等则采用飞溅润滑。润滑油在主机油泵的作用下,由油底壳进入热交换器冷却。冷却后的润滑油一路经粗滤器过滤进入总油道,另一路以较少的流量经离心精滤器回到油底壳。进入总油道的润滑油一部分润滑传动齿轮系和凸轮轴承等,一部分进入机体 V 形夹角主机油道,通过分布在各零件内的油道送至曲轴组、连杆组和活塞组各运动件的摩擦表面进行润滑。经过所有摩擦副表面的润滑油,在完成润滑、冷却、清洗、密封等使命后,全部返回油底壳。

活塞组与气缸套是柴油机实现压燃气体作功的一对摩擦副,活塞在高温、高压条件下进行高速往复运动。东风_{4B}型内燃机车 16V240ZJB 型柴油机,其活塞顶面直接与 1 500~2 000 ℃ 的炽热燃气相接触。活塞自身体温将达到 320 ℃ 以上(铝活塞)或 400 ℃ 以上(铸铁活塞)。柴油机在输出功率为 2 427 kW 时的爆发压力达 11.96 MPa,此时作用在活塞顶面上的气体压力为 562.6 kN。在标定转速为 1 000 r/min 时,活塞平均速