

磨粒图谱

〔美〕 D. P. 安德森 编

机械工业出版社

内 容 简 介

本图谱系统地汇编了机器摩擦副产生的各种典型磨粒及机器润滑油中所含的各种污染微粒的照片,对它们的特征及产生机理或来源作了较详细的说明。图谱全面地阐述了应用于铁谱技术中的各种分析方法及其基本原理,给出了开展铁谱分析的标准程序。此外,本图谱还用较多篇幅列举了在各种重要的机器系统中,应用铁谱技术进行工况监测的实例。

本图谱是掌握和应用铁谱技术的指南,对开展磨损机理的研究和机器工况的监测有较大的实用价值。

本图谱可作为科研单位、厂矿企业科技工作者的工具书,也可供高等院校有关专业的师生参考。

Wear Particle Atlas

(Revised)

Prepared for:

Advanced Technology Office

Support Equipment Engineering Department

Naval Air Engineering Center

Lakehurst, New Jersey 08733

28 JUNE 1982

REPORT NAEC 92 163

by Daniel P. Anderson

* * *

磨 粒 图 谱

[美] D. P. 安德森 编

金元生 杨其明 译

*

责任编辑: 常燕宾

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第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 787×1092 1/16 · 印张 6 · 插页 16 · 字数 184 千字

1987年10月北京第一版·1987年10月北京第一次印刷

印数 0,001—1,700 · 定价: 3.40 元

*

统一书号: 15033·6498

译 者 的 话

七十年代初国外开始发展起来的铁谱技术在我国摩擦学领域内日益受到重视,并已在许多高等学校、科研机关和产业部门推广应用。有的单位引进了国外的铁谱仪,有的单位购置了国产的铁谱仪。铁谱技术的应用部门目前感到最迫切需要的是备有一套标准的磨粒图谱,以便在分析铁谱片上沉积的磨粒时有所借鉴。

用铁谱技术将磨粒自载体中分离出来并沉积在铁谱基片上,再借助光学显微镜和扫描电子显微镜对其进行观察和分析是研究磨损机理和监控机器磨损状况的一种十分有效的手段。磨粒带有关于磨损表面的重要而详尽的信息,这类信息是依靠磨粒的形态、成分、粒度及其分布以及浓度这样一些特征来传递的。为了在分析时做出正确的判断,制定标准的磨粒图谱极为重要。磨粒图谱应能反映出磨粒的典型特征,并能阐明其产生机理,进而说明磨损的类型或预断机器的状态。然而,制定标准的磨粒图谱应该是一个逐步积累的过程,需要各部门从事铁谱技术应用研究的工作者们长期地共同努力,不断地筛选和修订各种典型图例才能完成。

在国内的磨粒图谱尚未组织编制之前,为了解决铁谱技术工作者的急需,现将美国泰勒斯公司(Telus Inc.) 1982年6月出版的磨粒图谱(修订版)[WEAR PARTICLE ATLAS (REVISED)]翻译出版。这本图谱是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)发起编制的。美国及英国的许多著名研究机构参加了工作,许多著名的学者在铁谱技术及磨粒分析方面所进行的工作在本图谱中也有所反映。因此,它的内容十分丰富和全面,不仅适用于铁谱技术工作者,对其它摩擦学工作者也有较大的参考价值。

为了兼顾科研、生产和教学多方面的需要,中译本采用图册和幻灯片两种方式发行。幻灯片已由清华大学图片社出版发行,本次出版的图册系磨粒图谱(修订版)的全译本。由于译者的水平有限,也由于有关铁谱技术的专用名词和术语尚无统一标准的中译名,因此译文难免有不当之处,尚希读者指正。

译 者

前 言

这本图谱是在1971年铁谱技术问世以来大约10年内积累的经验基础上编制的。修订后的磨粒图谱包括了1976年出版的磨粒图谱第一卷的全部内容。第一卷磨粒图谱的作者是E. Roderic Bowen和Vernon C. Westcott, 发起编制的机构是美国海空工程中心。在美国和英国的若干个试验室内进行了大量的研究工作才使第一版图谱得以问世。美国海空工程中心提出编制图谱合同的目的, 旨在综合出有关实际机器的不同磨损状况所产生的磨粒类型方面的知识。根据合同, 美国的SKF研究试验室、福兰克林研究院和海空推进器研究中心参加了编制修订版图谱的工作。此外, 英国国家工程实验室的Mr. Douglas Scott、英国海军部材料试验室的Dr. Gerald Heath和Dr. Geoffrey Pocock以及英国斯旺西大学的Frederick Barwell教授等人的工作也被公认在编制本图谱工作中起了很大作用。

有关铁谱片上磨粒的X-射线能谱分析方面的研究工作是委托美国国家标准局的Dr. William Ruff完成的。

以下诸位也为本图谱提供了有用的材料:

R. C. Moore Colorado Interstate Gas Company

Michael D. Perkins Corpus Christi Army Depot.

Nannaji Saka Massachusetts Institute of Technology

Glenn R. Taylor The Dow Chemical Company, Texas Division Solvay and Cie, S. A., Belgium

A. R. Jones Eastern Airlines

下列各位Foxboro公司的雇员为图谱的编制提供了技术咨询和帮助:

E. Roderic Bowen

Roger H. Rotondi

Raymond J. Dalley

Irma E. Ruggles

Richard D. Driver

Anthony P. Russell

Shirley M. Hodder

Vernon C. Westcott

最后还应提到, 海空工程中心新技术开发室(代号92A3)的技术联络官Mr. Peter M. O'Donnell对本工作的支持和指导以及海空工程中心的Mrs. P. Hamilton(编辑、办公室代号92A1C)所做出的杰出贡献。

引 言

磨粒分析是机器的油润零件无损检验的一种有效手段。润滑油内所含的磨粒带有关于机器状态的详尽而重要的信息。这类信息可以从磨粒的形状、成分、粒度分布和浓度来推断。磨粒的特征是十分鲜明的，因此可以确定机器中发生的磨损类型，并从而预报机器的危险状态，常常可以采取的措施来校正非正常的磨损状态而不必解体大修，例如针对磨料污染所采取的换油或更换滤清器的措施。此外，及时进行大修可以预防付出昂贵代价的第二次损坏。

本磨粒图谱论述了有关识别各种不同类型的磨粒，阐明产生这类磨粒的磨损类型及其导致的后果等，还介绍了便于进行磨粒分析的各种技术。

本磨粒图谱是修订版，也是1976年出版的第一卷磨粒图谱的增订版。第一卷图谱只介绍了各种非氧化的黑色金属磨粒和有关铁谱分析技术的知识。在修订版的磨粒图谱中，第一章的1.1~1.5节列出了黑色金属磨粒，它包括了原图谱的所有照片，仅对原文做了少量编辑上的变动。原图谱的铁谱分析技术部分以“操作程序”的题名列在新图谱的第三章中，它更详尽地介绍了铁谱分析技术并讨论了磨粒定量方面的问题，以求对定量数据做出解释。新图谱补充了1.6~1.9节，以说明有色金属、氧化物、润滑油变质产物和污染物。新图谱的第二章列出了一些分析实例，它可作为参考工具供为进行机器系统监控而对磨粒做实际分析的工作者们之用。

图号	名 称	页 码
2.2.2.4	第10101号发动机 D _s 累积值与油样序号的关系	23
2.2.2.5	第10200号发动机 D _i 累积值与油样序号的关系	24
2.2.2.6	第10221号发动机 D _i 累积值与油样序号的关系	24
2.2.2.7	第10221号发动机 D _s 累积值与油样序号的关系	25
2.2.2.8	第10223号发动机 D _i 累积值与油样序号的关系	25
2.2.2.9	第10223号发动机 D _i 累积值与油样序号的关系 (局部放大)	26
2.2.2.10	第10223号发动机 D _s 累积值与油样序号的关系	26
2.2.2.11	第10231号发动机 D _i 累积值与油样序号的关系	27
2.2.2.12	第10536号发动机 D _i 累积值与油样序号的关系	27
2.2.3.1	铁谱片分析报告单, 铁谱片号 4359	30
2.2.3.8	从 T53型发动机拆下的超速控制轴	31
2.2.3.9	铁谱片分析报告单, 铁谱片号 4204	32
2.2.3.13	解体后的轴齿轮轴承	31
2.2.3.14	铁谱片分析报告单, 铁谱片号 4364	33
2.2.3.19	T53型发动机的部分磨损零件	34
2.2.3.20	T53型发动机的部分磨损零件	34
2.2.3.21	铁谱片分析报告单, 铁谱片号 0017	35
2.2.3.26	失效的轴承	36
2.2.3.27	铁谱片分析报告单, 铁谱片号 4270	37
2.2.3.33	从一架 UH 1H 传动系统中拆下的轴承	38
2.3.1	齿轮失效方式	38
2.3.2	齿轮系工作规范	38
2.4.1	科罗拉多 (Colorado) 州际天然气公司的分析报告	43~44
2.5.1	铁谱片分析报告单, 铁谱片号 0242	45
2.7.5	花键磨损曲线	48
2.9.1	铁谱片分析报告单, 铁谱片号 0566	50
3.1.1.1	油路简图	52
3.1.1.2	磨粒平衡浓度的建立	53
3.1.1.3	磨粒平衡浓度的建立	54
3.1.1.4	理想化的光谱与铁谱数据之比较	55
3.1.2.1	油中球形颗粒的沉降速度	57
3.1.3.1	磨粒浓度稀释程序	60
3.2.1.1	双色显微镜光路图	61
3.2.1.2	测取铁谱片读数的原理	62
3.2.1.3	高倍物镜	62
3.2.2.1	铁谱片分析报告单, 空白	63
3.2.3.1	直读 (DR) 式铁谱仪简图	66
3.2.3.2	直读 (DR) 式铁谱仪中磨粒的沉积	67
3.2.5.1	索尔瓦伊 (Solvay) 公司铁谱分析的总报告	70~74
3.2.6.1	干涉色的形成	76
3.2.6.2	可见光谱	76
3.2.10.	光学显微镜中偏振片的配置	83

图 号	名 称	页码
3.2.10.2	在正交偏振片间的双折射颗粒	83

表 格 目 录

序 号	名 称	页码
1.6.1	白色有色金属的识别	7
2.2.2.1	发动机拆下前最后一次取样的直读 (DR) 读数	20~21
2.2.2.2	几台发动机的基准直读 (DR) 读数	21
2.2.2.3	图2.2.2.1~2.2.2.12 中采用的缩写符号	21
3.1.1.1	$X=1$ 时的 $N(a_i, n)$ 值	55
3.2.2.1	游离金属磨粒的区分	64
3.2.2.2	分析铁谱片的推荐步骤	65
3.2.6.1	用铁谱片加热分析法识别磨粒	77
3.2.8.1	选作研究之用的润滑脂种类	80

目 录

1 磨粒的识别	1
1.1 正常磨损和磨合期磨损	2
1.2 切削磨损	3
1.3 滚动疲劳 (滚动轴承)	4
1.4 滚-滑复合磨损 (齿轮系)	5
1.5 严重滑动磨损	6
1.6 有色金属	7
1.6.1 白色有色金属	7
1.6.2 铜合金	8
1.6.3 铅/锡合金	8
1.7 铁的氧化物	9
1.7.1 铁的红色氧化物	9
1.7.2 铁的黑色氧化物	10
1.7.3 暗金属 氧化物	10
1.8 润滑剂变质产物和摩擦聚合物	11
1.8.1 腐蚀磨损微粒	11
1.8.2 摩擦聚合物	11
1.8.3 二硫化钼	12
1.9 污染颗粒	12
1.9.1 新油中的污染	12
1.9.2 新润滑脂中的污染	13
1.9.3 道路尘埃	13
1.9.4 煤尘	13
1.9.5 石棉屑	14
1.9.6 机械加工间的空气污染	14
1.9.7 滤清器材料	14
1.9.8 碳片	14
2 机器监控实例	15
2.1 柴油发动机	15
2.1.1 正常运转的柴油发动机	15
2.1.2 铸铁磨损	16
2.1.3 钢磨损	16
2.1.4 腐蚀磨损	17
2.1.5 磨料磨损	18
2.1.6 有色金属磨损	18
2.2 航空燃气轮机	19

2.2.1	引言	19
2.2.2	机群监控	19
2.2.3	军用润滑油分析计划	29
2.3	齿轮	38
2.3.1	齿轮过载	39
2.3.2	因润滑剂性能不良造成的严重滑动磨损和过载	39
2.3.3	油中含水	40
2.3.4	磨料磨损	41
2.3.5	光谱仪报警/正常磨损	41
2.3.6	延长使用至计划检修	41
2.4	天然气内燃机	42
2.4.1	预分析报告的讨论	42
2.5	滑动轴承	42
2.6	液力系统	46
2.7	花键/微动磨损	47
2.8	滚珠螺杆	48
2.9	圆锥滚子轴承	49
3	操作程序	52
3.1	取出有代表性的油样	52
3.1.1	机器内磨粒的性态	52
3.1.2	取样技术	56
3.1.3	油样的配制和油样的稀释	59
3.2	铁谱分析技术	60
3.2.1	铁谱片的光学显微镜观察	60
3.2.2	铁谱片分析报告单	62
3.2.3	直读 (DR) 式铁谱仪	66
3.2.4	磨损状态的定量分析	67
3.2.5	制定工况监控程序	68
3.2.6	铁谱片加热分析法	75
3.2.7	扫描电子显微镜的观察和 X 射线分析	78
3.2.8	润滑脂的铁谱分析	79
3.2.9	非磁性颗粒的沉积	81
3.2.10	偏振光的应用	82
	参考文献	85
	索引	87

显微照片以外的图目及黑白照片目录

图 号	名 称	页码
1.1	铁谱片上磨粒的沉积状态	1
2.2.2.1	第10056号发动机 D _t 累积值与油样序号的关系	22
2.2.2.2	第10093号发动机 D _t 累积值与油样序号的关系	22
2.2.2.3	第10101号发动机 D _t 累积值与油样序号的关系	23

1 磨粒的识别

虽然除铁谱技术之外尚有其它各种分离方法可用于磨粒分析,但在本图谱中所述之磨粒均系采用铁谱技术分离并进行考察的 [1] [2]。铁谱技术利用高梯度的磁场将磨粒从流体试样中分离出来且加以固定,流体试样经过一个特殊制备的,与水平呈一很小夹角放置的显微镜样片(铁谱基片)而流下。待试样全部通过基片后,用溶剂清洗基片以去除残液。当溶剂干燥后就得到一片可供分析的铁谱片。

图1.1所示为铁谱片上磨粒的沉积状态。铁谱片上位置的坐标是从出口端算起。流体最先与基片接触的入口端距出口端约为56mm,在出口端,试样离开基片并通过回油管被收集。最大的铁磁性磨粒沉积在铁谱片的入口区,因为磨粒所受的磁吸引力与其体积成正比,而磨粒在流体中运动的各种阻力与其表面积成正比。如果磨粒形状相同,它通过流体向下的运动作为其粒度的函数将取决于磨粒尺寸的立方与磨粒尺寸的平方之比。因此最大的铁磁性磨粒将最先沉积。当试样流至50mm的部位时,长轴方向尺寸大于 $2 \sim 3 \mu\text{m}$ 左右的铁磁性磨粒早已沉积完毕。在铁谱片的出口端,铁磨粒接近或低于光学显微镜分辨率的下限(约 $0.5 \mu\text{m}$)。铁(磁性)磨粒沉积成链状,沿着置于铁谱基片下方的磁铁组的磁力线方向排列。沉积链垂直于试样的流动方向。本图谱中的显微照片在每页上均依试样流动方向自上而下地列出。

第1.1~1.5节中讲述的磨粒基本上是钢和钢基合金产生的。其它金属和合金也会产生类似形状的磨粒,仅有的微小差异可归因于该种材料的硬度和晶粒结构与钢的不同。这几节涉及的是所产生的游离金属磨粒(类似基本金属,非化合物),依以下顺序论述:

1.1 正常磨损和磨合期磨损

滑动表面经常发生的平缓的正常磨损。

1.2 切削磨损

由于滑动表面的相互穿入引起的非正常磨料磨损。

1.3 滚动疲劳(滚动轴承和齿轮系)

滚动接触表面的疲劳磨损。

1.4 滚-滑复合磨损

与齿轮系相关的非常的疲劳和胶合磨损类型。

1.5 严重滑动磨损

滑动表面的过载和高速造成的磨损。

第1章的其它各节讲述了有色金属磨粒、铁的氧化物、润滑剂变质产物和污染颗粒。

光学显微镜和扫描电子显微镜在磨粒分析中有其各自的优点。既利用透射光又利用反射光的双色显微镜可以确定磨粒的消光程度和颜色。根据这种信息可容易地看出磨粒是游离金

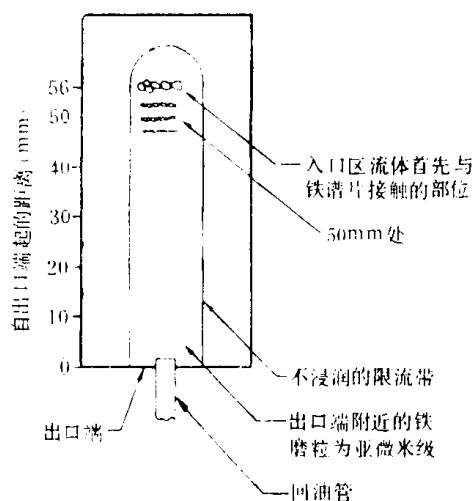


图1.1 铁谱片上磨粒的沉积状态

属还是化合物。利用偏振光做进一步分析还可获得有关各种化合物之结晶组织方面的情况。详见3.2.1节关于铁谱片的光学显微镜考察部分。

在要求用长焦距对磨粒的构成进行拍照的研究工作中, 扫描电子显微镜(SEM)特别有用。然而, SEM只能显示颗粒的形状而不能区分(例如)是透明的砂粒还是金属剥片。因之, 仍然有必要用光学显微镜(在本图谱的显微照片上用缩写符号Opt.M.表示——译者注)或其它方法考察铁谱片, 以获取有关磨粒的成分及其来源的最丰富的信息。SEM所能给出的更高的放大倍数只是偶而有用, 光学显微镜所能达到的 $1000\times$ 的最高放大倍数通常对于磨粒分析已经足够。

1.1 正常磨损和磨合期磨损

正常磨损的磨粒是机器正常滑动磨损产生的。

在磨损表面的正常磨合期, 表面形成一均匀的薄层。一个磨损表面的磨合过程可以定义为“加工状态”的表面向一个光滑的低磨损表面之过渡。表面的机械加工将金属的结晶组织打碎, 形成一极薄的微晶(约 30nm)结构层, 钢的微晶结构层约为厚 $1\mu\text{m}$ 。该微晶结构层被称为切混层。

切混层显示出极高的延展性, 它可沿表面滑动数百倍于其厚度的距离。它的这种承受应力时的滑动能力将形成极光滑的磨痕。只要切混层是稳定的, 表面即将处于正常磨损。如果表面滑动速度增加到使切混层的消除速度比其形成速度快, 则磨损速度就会增大, 而且最大的磨粒粒度也从 $5\sim 15\mu\text{m}$ 变到大至 $50\sim 200\mu\text{m}$ 。详见1.5节“严重滑动磨损”。

正常磨损磨粒是机器正常滑动磨损产生的, 是切混层局部剥离的结果。

典型的正常磨损磨粒呈薄片状, 其尺寸范围是其长轴尺寸从 $15\mu\text{m}\sim 0.5\mu\text{m}$, 甚至更小。它们具有光滑的表面, 厚度在 $0.15\mu\text{m}\sim 1\mu\text{m}$ 之间。长轴尺寸与厚度之比的变化, 较大的磨粒约为 $10:1$ 而 $0.5\mu\text{m}$ 的磨粒约为 $3:1$ 。

在磨合期内, 可见到正常磨损磨粒与其它的较大磨粒共存。这些较大的磨粒是表面光滑化的过程中被破碎的磨削波纹和其它各种表面凸起所形成的碎片。在磨合期内切混层会封盖表面的划痕和凸起。有时, 某些小片的切混层会在表面的划痕和其它凹坑处呈悬臂状伸出并被打破, 这就是一些较大的正常磨损磨粒的来源。

在稳定的磨损表面形成之后, 切混层连续剥落并产生正常磨损磨粒。

过量的粒状污染物, 例如润滑系统中的砂粒可能使正常磨损的产生速度增高一个数量级以上, 但尚未完全破坏切混层。虽然损坏失效不大可能发生, 但这样的系统会很快磨损。在这种情况下, 虽然全部磨粒可能主要是正常磨损磨粒, 但故障的临近可用磨粒数量的显著增加来预断。磨粒的实际增加量决定于污染颗粒的粒度、浓度、成分和形貌。对这一问题敏感的是那些摩擦副表面的硬度大致相同的零件, 例如柴油机的缸套和活塞环, 此类油样的磨粒将显示出含有污染的颗粒以及磨粒。

图1.1.1~1.1.5所示为柴油发动机产生的正常磨损磨粒。照片取自铁谱片的同一位置, 具有不同的放大倍数。图1.1.1照片所显示的是入口处沉积状态, 图1.1.3和图1.1.4则表明存在的最大磨粒为 $10\mu\text{m}$ 。一般而言, 正常磨损磨粒的最大粒度约为 $15\mu\text{m}$ 。

(-) 凡彩色图均排在89页以后, 请对照参阅。下同。——编者

图1.1.6是实际入口处沉积状态的照片。根据有些磨粒的取向可以看出，它们是厚度不大于 $1\mu\text{m}$ 的薄片。

图1.1.7是图1.1.2的双色显微镜照片。

图1.1.8~1.1.10指明了在铁谱片不同部位最大的铁磁性磨粒的粒度。图1.1.8所示为紧靠入口处下方立即沉积的磨粒。此处最大磨粒的粒度即为油样中最大磨粒的粒度，此例中为 $15\mu\text{m}$ 。

图1.1.9是取自铁谱片50mm处的照片。从这一照片上所见的白色颗粒实际上是不大于 $0.2\mu\text{m}$ 的单个小磨粒所构成的短链。

必须指出这种粒度分布是铁磁性材料的特征。弱磁性磨粒沉积在铁谱片更靠下的部位。见1.6节“有色金属”。

图1.1.11~1.1.14所示为磨光或具有机加工表面粗糙度等级的零件在磨合期内产生的典型磨粒。在磨合期内，磨损表面上的微凸起被压平，并沿微凸体的峰顶形成折檐。这些折檐随后被破碎形成细长的片状磨粒，如照片所示。这类磨粒的数量逐渐减少，直至原始加工条痕被封盖或被磨去。

图1.1.15所示为个别的单个磨粒。

图1.1.16所示为在入口区之后立即沉积的较小磨粒。虽然磨粒量不大，但这类磨粒有几个仍然具有磨合过程产生的细长形薄片状及直棱边的典型特征。

1.2 切削磨损

切削磨损磨粒是由于一个表面穿入到另一个表面而产生的。其产生磨粒的效应与车床机加工产生切屑极为相似，只是处于显微数量级。

产生这种效应的方式有两种。较硬的零件可能由于安装不良或出现裂纹，造成硬的刃边穿入较软的表面。这种方式产生的磨粒通常是粗大的，其平均宽度为 $2\sim 5\mu\text{m}$ ，长度为 $25\sim 100\mu\text{m}$ 。

此外，润滑系统中的坚硬的磨料磨粒，无论是石英砂一类的污染颗粒还是来自系统内其它零件的磨屑，均有可能嵌入软的磨损表面（双体磨料磨损），例如铅/锡合金的轴承表面。磨料颗粒自软表面伸出并穿入相对的磨损表面。以这种方式产生的切削磨损的磨粒，其最大粒度与润滑剂中所含的磨料磨粒的粒度成正比。另外还可能产生极细的线形磨粒，其厚度小到只有 $0.25\mu\text{m}$ 。在一个正在磨损的表面内含有硬夹杂物，偶而也会产生长度约为 $5\mu\text{m}$ ，厚度为 $0.25\mu\text{m}$ 的小磨粒。

润滑系统中存在着磨料污染物并非一定造成切削磨损，虽然系统的磨损速度可能增加。两个硬度接近的处于磨损的表面，粒状污染物不会在一个表面内嵌入，它们不大会因磨料污染物的存在而引起切削磨损（见1.1节）。这是三体磨料磨损过程。

切削磨损磨粒是非正常的磨粒，它们的存在和数量应予以仔细地监控。如果系统中大多数切削磨损磨粒的粒度是约数微米长，不足 $1\mu\text{m}$ 宽，即应预断为有粒状污染物存在；如果系统中出现大的切削磨损磨粒（ $50\mu\text{m}$ 长）之数量增加，则零件的损坏可能已迫在眉睫。

图1.2.1~1.2.4是用一台处于损坏阶段的喷气发动机的油样所制成的铁谱片上同一部位

“双色”这一术语在本图谱中特指采用红色反射光和绿色透射光同时照明的情况。——译者注

的几个视场。因为大多数切削磨损磨粒呈大而长的条状，故可预断是零件发生了损坏，铁谱片上不存在任何异常的污染物更加证实了这一判断。

图1.2.5及1.2.6是相同部位的光学显微镜和扫描电子显微镜的照片。这两张照片显示了切削磨损磨粒的粒度和形状可能存在的变化。

图1.2.7~1.2.9所示为液力系统中磨料污染物(“亚利桑那道路尘埃”——Arizona Road Dust)所引起的严重切削磨损。岩石状颗粒即为实际存在的污染物。事实上，铁谱片上的其它物质均为金属切削磨粒。

图1.2.10~1.2.12是同一个切削磨损磨粒的白色反射光照明、双色照明和SEM的照片。

图1.2.13~1.2.14是极细的切削磨损磨粒的双色照明和SEM的照片。最大的一颗磨粒的高度大于光学显微镜的焦深。其高出玻璃基片的弯曲部分不能与基片表面同时聚焦。

图1.2.15~1.2.18是选出的几个切削磨损磨粒的SEM的显微照片。

1.3 滚动疲劳(滚动轴承)

本节涉及的主要是滚动轴承疲劳产生的磨粒。与轴承的其它问题相关的磨粒，例如与滚子端面的磨损、咬死以及含有滑动的任何其它接触相关的磨粒在1.1节和1.5节中讨论。

有三种不同类型的磨粒与滚动轴承疲劳有关：即疲劳剥离磨粒、球状磨粒和层状磨粒。

疲劳剥离磨粒是在点蚀或麻点形成时，由剥离的实际材料构成。在显微开裂的过程中，这类磨粒的最大粒度可达100 μm 。当开裂达到宏观程度且发生损坏时，这类磨粒的粒度仍有可能继续增大。初始的异常状态可以从10 μm 的磨粒的数量不断增加而加以推断。疲劳磨粒是平片状的，其长轴尺寸与厚度之比约为10:1。它们具有光滑的表面和随机曲折的轮廓。识别这类磨粒的能力极其重要，因为对于轴承而言，造成性能严重下降的磨粒数量大大低于其它装置。

与滚动轴承疲劳有关的球形磨粒产生于轴承疲劳裂纹内部。球形磨粒一经产生，它的存在就提供了一个极好的故障临近的报警信号。因为在出现任何实际剥离之前，就可以检出球形磨粒。业已发现，在高于正常负荷和清洁的润滑系统中进行试验的轴承，虽未出现足够数量的球粒，但已经疲劳。因之，在非正常磨损状态下滚动轴承发生疲劳的可能性，不应因不存在球形磨粒而排除。然而，在迄今为止被监控的多数工业系统中，滚动轴承的疲劳剥离是依靠出现大量的直径为1~5 μm 的钢球粒来预断的^{[3][4]}。处于疲劳阶段的轴承估计在其损坏过程中会产生数百万计的球粒。

滚动轴承的疲劳不是产生金属球粒的唯一来源。已知球粒还因气蚀而产生，焊接和磨削工序则产生得更多。产生于疲劳裂纹内部的球粒，可以根据其粒度分布将它们与其它机理产生的球粒加以区分。滚动疲劳几乎不产生大于3 μm 的球粒，而焊接、磨削和气蚀等机理产生的球粒往往大于10 μm 。制造厂商提供的润滑油常常含有金属颗粒，包括金属球粒和其它污染颗粒。因之必须注意避免将这些污染物球粒与因轴承疲劳产生的球粒相混淆。

层状磨粒是极薄的游离金属磨粒，其粒度在20~50 μm 之间，长轴尺寸与厚度之比约为30:1。可以认为，层状磨粒很可能是因磨粒在粘附于滚动元件的表面之后，又通过滚动接触而形成的。在这类磨粒上经常可以见到空洞，此现象与上面这种解释相符合。层状磨粒可能在轴承的整个使用期内产生，但是疲劳裂纹一旦形成，其产生数量即会增加。因之，层状

磨粒的存在量增大，並伴有因其它某种原因造成的严重磨损便预示滚动轴承出了问题。与此相类似，层状磨粒数量的不断增加与大量球形磨粒的同时存在，被当作存在着将导致剥离的滚动轴承显微疲劳裂纹的标志。

图1.3.1所示为滚动轴承正常运转期内产生的磨粒之典型分布。

图1.3.2~1.3.5所示为放大倍数逐渐增大的滚动轴承疲劳剥离产生的磨粒。注意其光滑的表面和不规则的轮廓。还应注意，在光学显微镜下所见磨粒表面的显微麻点实际上是更小的磨屑碎片。

图1.3.6~1.3.8所示为另一组放大倍数逐渐增大的滚动轴承疲劳磨粒的照片。图1.3.6清楚地显示出几乎不存在正常磨损磨粒。这种大磨粒（ $20\mu\text{m}$ ）数量和小磨粒数量（ $2\mu\text{m}$ ）的高比例是纯滚动元件疲劳的典型特征。几乎没有正常磨损的磨粒的情况在整台机器的油样中很难看到，因为除轴承外，尚有许多其它零件也在产生磨粒。

图1.3.9及1.3.10所示为滚动元件疲劳可能产生的磨粒所具有的不规则形状及粒度。

图1.3.11~1.3.13是金属球粒的照片。它们比通常轴承疲劳所产生的球粒大得多。这些球粒可能来自外部，用它们是为显示球粒的光学特性。球粒的曲率使来自上面的光反射到旁侧而不能直接反回物镜。为了显示球粒，要求有从广角受光的物镜。这种物镜称之为高数值孔径（NA）物镜。NA是 $1/2$ 孔径角的正弦值。为适于观察球粒，数值孔径应为0.85或更高。由于球形表面的凸面镜效应，一个插在反射光光路内适当位置的物体，可在球粒表面聚焦成像。图1.3.11有插入光路内的一个针尖，图1.3.12有部分插入光路内的一个红色滤色片。磨粒表面亮度变化的光和黑色的条纹是灯丝的映像。这种反射映像的特性能使球粒易于在显微镜下被识别。

图1.3.14是上述实例在较高放大倍数下的SEM照片。应该指出，有些润滑系统可能产生塑料球粒，它们与磨损表面无关。光学显微镜可以根据它们的透光能力对它们加以区分。在双色照明条件下，这类球粒呈绿色而金属球粒呈红色。

图1.3.15及1.3.16所示为正在发生疲劳损坏的轴承所产生之球粒的全貌。图1.3.17是这些球粒在更高放大倍数下的SEM照片。

图1.3.18~1.3.20所示为滚动轴承所产生的层状磨粒。这些磨粒没有大于 $1\mu\text{m}$ 厚的。注意后面一个例子，图1.3.19和1.3.20，磨粒上有空洞。

1.4 滚-滑复合磨损（齿轮系）

在本节中所考虑的齿轮磨损类型是节线处的疲劳以及胶合和擦伤。因低速过载而引起的不常见的过载磨损归入严重滑动磨损类型中，见1.5节。类似地润滑剂中磨粒污染物造成的效应归入1.1节和1.2节。

从齿轮节线处产生的磨粒与滚动轴承疲劳磨粒有许多共同点。它们通常均具有光滑的表面和常常是不规则的外形。按照齿轮的设计，磨粒可能具有的长轴与厚度的比值为4:1~10:1。较厚的磨粒是因为齿轮表面存在着拉应力的结果。表面拉应力使疲劳裂纹在剥离之前向轮齿的更深处发展。

如滚动轴承疲劳时一样，也发现大磨粒相对小磨粒有高的比例。

齿轮胶合是因过高的载荷和（或）速度造成的。过热现象的产生使油膜被击穿并造成处

于啮合的轮齿发生粘着。磨损表面的拉毛导致磨损速度进一步增加。受到影响的齿面区域是在节线与齿顶和节线与齿根之间。这种现象一旦发生,一般胶合就会影响到齿轮的每一个轮齿,並产生大量的磨屑。

因为在磨损接触时,无论滑动速度还是滚动速度都有很大的波动,所以产生的磨粒之特征相应地也有很大的变化。在胶合状态,大磨粒与小磨粒之比很小。所有的磨粒均趋于具有被拉毛的表面和不规则的轮廓。甚至小磨粒也可根据它们的特征与正常磨粒加以区分。一些大磨粒具有表面划痕表明是滑动接触。由于胶合的热效应,通常有大量氧化物存在,而且有些磨粒会显出局部氧化的迹象,即显出棕色或蓝色的回火色。氧化程度决定于润滑剂和胶合的严重性。

图1.4.1~1.4.4是齿轮疲劳磨粒放大倍数逐渐增大的照片。大磨粒与小磨粒之高比例十分明显,而且大磨粒的表面是光滑的。

图1.4.5~1.4.10所示为4个单粒齿轮疲劳磨粒。图1.4.5、1.4.6、1.4.9和1.4.10显示出因齿轮疲劳而可能产生的磨粒之不规则形状。图1.4.7和1.4.8则为典型的剥块状磨粒。这个磨粒为7 μm 厚,形状因子(长轴尺寸/厚度)为5:1。

图1.4.11~1.4.14是典型的胶合磨损磨粒的分布状态。如果将图1.4.13和1.4.14与图1.1.3和1.1.4做比较,则较小的胶合磨粒和正常磨粒之间的差异就更加明显。表面有划痕的较大磨粒可能产生于齿顶或齿根附近,此处滑动速度最高,而无表面划痕的磨粒可能在更接近于节线处产生。

图1.4.15~1.4.17是单粒胶合磨损磨粒。这几张光学照片中,磨粒表面的黑色部分是氧化的结果。

1.5 严重滑动磨损

因为负荷和(或)速度的原因,磨损表面的应力过高时就会出现严重滑动磨损。此时切混层变得不稳定且大磨粒剥落,使得磨损速度增加。如果施加于表面的应力进一步增加,当整个表面发生剥落时,即达到第二转变点,而且出现破坏性的磨损速度。滑动磨损磨粒与产生它的表面之间的关系在文献[5]中有叙述。

大磨粒与小磨粒之间的数量比取决于表面应力极限被超过的程度。应力值越高,这一比值也越高。如果应力值缓缓地上升,即可发现先于任一种严重磨损磨粒出现之前,正常磨损磨粒的数量显著增加。

严重滑动磨损磨粒的粒度范围在15 μm 以上。这类磨粒有些有表面划痕,这是滑动的结果。通常它们均有直的棱边,其长轴尺寸与厚度之比约为10:1。随着这类磨损的程度加重,磨粒表面的划痕和直边也更显著。

图1.5.1~1.5.4是典型严重磨损磨粒的照片。大磨粒相对小磨粒的高比例证明应力值远远高于表面的允许值。

图1.5.5~1.5.7是严重滑动磨损磨粒的单粒光学显微镜照片。图1.5.7所示之磨粒显示出因高滑动速度引起的表面受热所造成的颜色。

1.6 有 色 金 属

铁谱片上具有非磁性沉积特征的金属磨粒是有色金属磨粒。与铁磨粒在定向沉积链内沿磁场方向整齐地排列相反,有色金属磨粒无定向地沉积,可能根本在铁磨粒的沉积链之外或在铁磨粒的沉积链之间。图1.6.1所示为沉积在铁谱片入口区附近的铁磨粒沉积链之间的一个铝磨粒。铁磨粒按其长轴尺寸严格地沿沉积链方向排列而取向,而铝磨粒的取向是随机的。有色金属磨粒沿铁谱片全长沉积,而长轴尺寸大于2或3 μm 的铁磨粒不会在低于50mm以下的位置沉积。因此,如果大于数微米的磨粒在离入口区有一段距离的位置被发现,它即为有色金属。图1.6.2所示为沉积在铁谱片出口端附近的一个铝磨粒。注意其附近的沉积链内的铁磨粒是何等的小。

1.6.1 白色有色金属

用光学显微镜观察时,白色有色金属磨粒实际上是无法区分的。它们均呈白色而且发亮,只是在被氧化物或其它化合物覆盖时才有例外。

表1.6.1可作为在不能应用SEM的X-射线分析时区分白色有色金属的指南。利用一小滴浓度为0.1N的酸或0.1N的碱溶液滴到在试验室热板上被加热至90℃的铁谱片上,然后进行化学浸蚀的分析结果简要地列在表的头两行中。加热加快了化学反应并使酸或碱液挥发。滴到铁谱片上的液滴应保持很小,因为液体有移动磨粒以致使得处理后难以再找到它的趋势。表的后4行说明了当铁谱片被加热到所列的各温度时,各种不同的有色金属所发生的颜色变化。第3.2.6节“铁谱片加热分析法”详细地介绍了这种方法。利用化学浸蚀法和加热处理的相互配合,所有的有色金属均能彼此区分。只有银和铬是例外,它们的特性类似。如果不能确定是银还是铬,则在有关被监控的系统中,对其润滑通路(材料的使用情况)方面的了解可以解决这一问题。此外,铬磨粒一般均极小,因为铬是十分硬的材料。较软的金属趋于产生较大的磨粒。应该注意表1.6.1所给出的结果是利用商用纯金属得到的。各种合金,甚至合金元素含量仅为百分之零点几时,也会具有极不相同的物理特性,因之可能与表1.6.1所示的识别过程有不同的反应。

表1.6.1 白色有色金属的识别

	0.1N HCl	0.1N NaOH	330℃	400℃	480℃	540℃
Al	溶	溶	不变	不变	不变	不变 ^①
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	棕色	—	—	—
Mg	溶	不溶	不变	不变	不变	不变
Mo	不溶	不溶	不变	带草黄至少少许深紫色的棕色		—
Ti	不溶	不溶	不变	亮棕色	棕色	较深的棕色
Zn	溶	不溶	不变	不变	棕色	带蓝的棕色

注意: 将铁谱片置于90℃的热板上, 加一滴酸或碱, 待酸或碱液挥发干后, 再拿下铁谱片

上述的每一实验均为将铁谱片置于所定之温度的热板上, 持续90s

^① 某些情况下发亮。

就实际情况而论,铝是最常见的出现在铁谱片上的白色有色金属。镁、铟和锌一般不会被在油润接触中被发现。钛用于航空气轮发动机,但更多地是用于发动机的气路部分而不是油润部分。在磨损接触中的钛零件应予很好的润滑,因为钛容易发生咬合。铬用作硬的耐磨涂层和钢的合金元素。从来不用铬制造零件,因为它太脆。银偶尔地用作高质量轴承的镀层。镉有时用作轴承合金的成分,有时用作镀层。

1.6.2 铜合金

铜合金很易于借助其特有的微红黄色加以辨认。没有其它常用金属具有这样的色泽。金是例外,但它仅用于极特殊的场合。然而,其它金属磨粒由于在其产生过程中受到高热,也会显出黄色或棕色的干扰色(回火色),这就有可能使得它们与铜合金磨粒相混淆(见3.2.6节“铁谱片加热分析法”)。棕色的铁磨粒不大会引起混淆,因为它们在铁谱片上具有磁性沉积特征(铜无磁性)。其它一些磨粒,例如钛、奥氏体不锈钢或巴氏合金可能在其正常的生成条件下就呈棕色,但是,在多数情况下它们所呈的颜色不如铜合金那么均匀,而且无论何时颜色均不会象某些铜合金那样发微红。如果存在一些呈棕色回火色的有色金属磨粒,它们有可能和铜合金相混淆,则必然还会有一些同一金属的磨粒,它们并未受到热影响;也还会有一些磨粒显出更重的回火色(蓝色或紫色回火色)。未必可能任何磨损过程对所有磨粒都产生一致程度的回火效应而形成同样的回火色。

当加热铁谱片或在磨粒形成过程中受到热效应时,铜合金本身也会形成回火色。然而,这类颜色变化对于识别特定的铜合金没有用处,因为可能有多种合金的颜色变化类似,而同一种合金又可能因其结晶构造、相偏析以及磨损过程引起的塑性预变形的情况不同而有不同的反应。

图1.6.2.1所示为在铁谱片入口处附近,沉积在铁磨粒链之间的一粒铜磨粒。图1.6.2.2所示为铁谱片加热至330℃后的同一视场。图1.6.2.3所示为从铁路车辆滚动轴承润滑脂样品中得到的一粒铜磨粒。为预防轴承的电腐蚀,采用了铜磨刷,这种时候铜有局部氧化而呈灰黑色。这个样品中有少数几个铜磨粒完全呈灰色。这三张照片表明了铜磨粒因其形成过程的不同而可能具有的表面颜色变化范围。

1.6.3 铅/锡合金

在铁谱片上经常可以看到许多游离的铅/锡合金磨粒。可能因为铅/锡合金有很好的塑性,故它们的形成机理是擦伤辗片而不是剥落。当在铁谱片上看到铅/锡磨粒时,磨粒多是被氧化的。这是因为对铁合金来说,仍属低温条件时,而铅/锡合金对氧化就已十分敏感了。事实上,轴承所碰到的一种损坏形式就是与润滑不良相关和(或)当起动或停车时难以建立或保持流体动力油膜相关的氧化磨损。有这类问题的轴承,拆检后可见到铅/锡氧化物剥落所形成的“黑疵”。

铅/锡轴承的另外两种主要损坏形式是污染磨损和腐蚀磨损。有非金属晶体颗粒和来自轴颈的切削磨损磨粒就表明有污染。腐蚀磨损造成极细的微粒在铁谱片出口端大量沉积。腐蚀磨损在内燃发动机中最常见到,柴油机最为显著,柴油机燃料中的硫形成硫酸。在汽油发动机或煤气发动机中是因曲轴箱油氧化形成有机酸而造成腐蚀磨损。这类酸浸蚀了铅/锡轴承并加速了活塞环/活塞的磨损。铅比锡对腐蚀敏感得多。

在某些用铁谱技术监控的轴承损坏实例中,除已被氧化的铅/锡磨粒外,还发现了极易识别的铜合金磨粒。在这类轴承中,铜合金表面有一层极薄的巴氏合金镀层,因之它既由于