

第 5 章

磨粒图谱识别与分割

铁谱分析是一种研究机械磨损现象,监测和诊断机器的磨损状态的技术。借助工业数字图像处理技术和深度学习方法实现对磨粒图谱的记录、分类、识别、检测、分割以及设备失效等级判定,已经成为铁谱分析的核心技术。

本章首先介绍铁谱分析技术流程、磨损机理以及常见的磨粒图谱,然后基于传统图像处理方法,对常见的磨粒图谱进行颜色特征、形状特征和纹理特征的比较研究;最后基于深度卷积神经网络进行磨粒图谱检测,并基于检测结果使用传统图像处理方法对磨粒进行准确分割。

5.1 铁谱分析技术

20 世纪 70 年代,国际摩擦学领域出现了一种磨损颗粒分析技术,称为铁谱分析技术。1979 年,我国参加欧洲摩擦学会议代表带回了铁谱技术的有关信息;1982 年,我国派代表出席了在英国召开的国际铁谱分析技术会议。之后的十几年里,铁谱分析技术在我国得到普遍应用。

铁谱分析技术指的是借助铁谱仪将磨损颗粒从润滑油中分离出来,并使其按照尺寸大小依次沉积在显微基片上制成铁谱片,然后将铁谱片置于铁谱显微镜或扫描电子显微镜下观察。通过对磨损颗粒数量、尺寸、形状与成分的分析,获得关于润滑设备磨损程度、磨损类型以及磨损部件等各方面的综合信息。这里,铁谱显微镜主要获得磨粒的数量、尺寸和形状信息;扫描电镜主要获得磨粒的形貌和成分信息。通过定期或不定期地收集并研究润滑设备磨粒信息,诊断机器的磨损状态和故障原因。这种从取样开始,制作谱片、观察成像直至对磨损状态做出分析与判断的技术,称为铁谱分析技术。

一般来说,铁谱分析流程分为取样、制作谱片、观察与分析 and 评级四部分。

(1) 取样指的是使用专业取油样工具从管线上或油箱中抽取润滑油(或液压油)样品,取样操作必须保证所取油样中含有反映机器服役工况的磨损颗粒,如此才能通过铁谱分析做出正确的判断。取样点的选择和取样时间间隔的确定,需结合具体设备工况进行科学的设计。

(2) 制作谱片指的是用铁谱仪分离出油样,将其中的铁磁性颗粒沉积于玻璃基片上,并进行固化和清洗。铁谱分析仪主要有两种类型:一种是直读式铁谱仪,如图 5-1 所示,可依据颗粒的沉积位置不同检测大于 $10\mu\text{m}$ 的大颗粒和小于 $5\mu\text{m}$ 的小颗粒;另一种是分析式铁谱仪,又可分为直线式铁谱仪和旋转式铁谱仪两种。直线式铁谱仪及制作的铁谱

谱片,如图 5-2 所示;旋转式铁谱仪及制作的铁谱谱片,如图 5-3 所示。



图 5-1 直读式铁谱仪

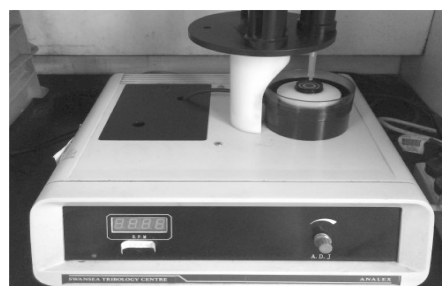


(a) 直线式铁谱仪

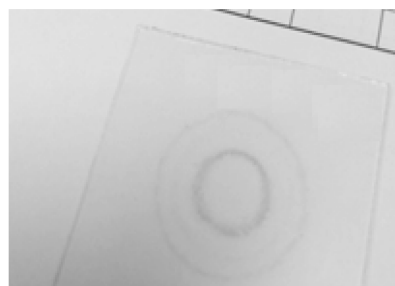


(b) 直线式铁谱仪制作的铁谱谱片

图 5-2 直线式铁谱仪及其制作的铁谱谱片



(a) 旋转式铁谱仪



(b) 旋转式铁谱仪制作的铁谱谱片

图 5-3 旋转式铁谱仪及其制作的铁谱谱片

(3) 观察与分析阶段可以采用定性分析和定量分析两种方法。定性分析指的是使用

显微镜观察谱片上颗粒的大小、形状和颜色,根据颗粒特征定性分析设备的运转润滑状态,判断磨损类型和磨损部位;定量分析指的是光密度测量仪与显微镜配套使用,测出谱片上不同区域的磨损颗粒覆盖面积,再使用公式计算出磨损指数。当然,也可以基于先进的数字图像处理方法对磨粒进行分割,判定磨粒类型,计算磨粒的个数和覆盖面积,从而计算磨损指数。

(4) 评级指的是根据观察与分析结果,对设备作出故障诊断结论,为科学地制定设备维护措施提供依据。

自铁谱分析技术提出以来,该技术得到长足的发展,为机械磨损监测、状态诊断和磨损机理的研究,开辟了一个以磨粒为对象的分析、研究和应用的新领域。铁谱分析技术在机器设备的磨损工况监测、设备故障诊断、磨损机理研究、润滑剂的性能评价、机械零件失效分析与可靠性研究等诸多方面得到广泛应用。其中,基于先进的数字图像处理技术,构建丰富的磨粒图谱库,实现准确的磨粒分类、检测和分割,直至对设备磨损做出科学的评级,具有十分重要的意义。

5.2 设备磨损机理

一般来说,机械设备的效能、可靠性和安全性,主要取决于设备摩擦的状态。但是,摩擦在大多数情况下是有害的,会造成能量消耗和零件磨损。因此,必须通过添加润滑油或润滑脂的方式减少摩擦。据有关统计数据,世界上有 $1/3 \sim 1/2$ 的能源以各种形式消耗于设备间的摩擦。摩擦可能产生磨损,磨损的产物即为磨粒。

机械设备的磨损一般分为 3 个阶段:初期跑合阶段、正常磨损阶段和严重磨损阶段,如图 5-4 所示。

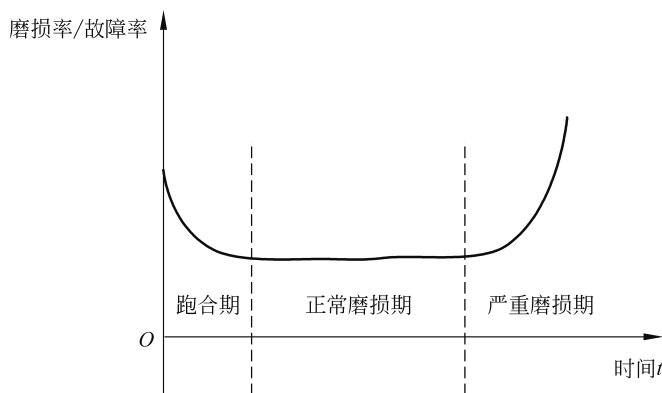


图 5-4 设备磨损的 3 个阶段

(1) 在初期跑合阶段,新设备的摩擦表面具有一定的粗糙度,实际接触面积较小。经过短时间运行跑合后,表面逐渐变得光滑。根据对跑合表面粗糙度形成过程的研究,跑合过程实际是接触面积的弹性部分逐步增加和塑性部分逐步减小的过程。跑合阶段是设备故障产生早期,主要产生正常磨粒、切削磨粒和少量的严重滑动磨粒。

(2) 在正常磨损阶段,设备的摩擦表面进入正常磨损期,这一阶段的磨损逐渐缓慢稳定,设备也处于稳定服役阶段,主要产生疲劳磨粒(包括片状磨粒、块状磨粒和疲劳剥离),后期可能产生大颗粒的块状疲劳剥离。

(3) 在严重磨损阶段,设备进入严重磨损期后,磨损速度或磨损幅度开始急剧增长。这段时间内,磨损率有一个递增的过程,一个磨损事件可能引发更多的磨损事件,机械效率下降,设备工作精度丧失,可能产生异常噪声和异常振动,最终导致设备失效。该阶段主要产生球状磨粒、严重滑动磨粒和大颗粒的疲劳剥离。

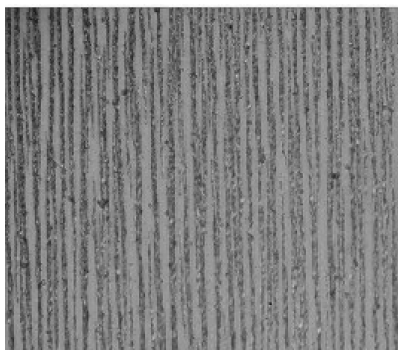
一般来说,细小的正常磨粒和各种氧化物磨粒将贯穿整个设备服役周期。但是,不同种类的设备系统不可能使用同一个磨损失效标准,需要根据设备具体使用情况进行科学的分级判定。

5.3 磨粒图谱

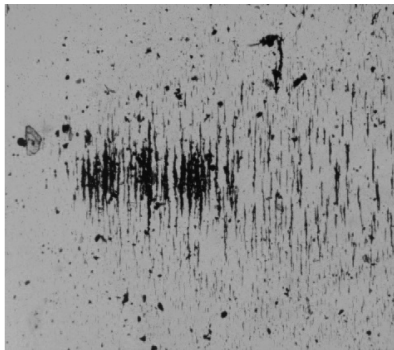
制作好谱片后,可以通过计算机接口将显微镜里的磨粒图像保存在计算机中,这种图像称为磨粒图谱。由于数字图片比实际铁谱谱片的保存更加方便、持久,也方便进行科学研究,因此磨粒图谱得到广泛应用。一般来说,磨粒图谱主要有:正常磨粒、切削磨粒、球状磨粒、严重滑动磨粒、疲劳磨粒、铜合金磨粒、黑色氧化物磨粒和红色氧化物磨粒。

5.3.1 正常磨粒

正常磨粒较为细小,呈薄片状,表面光滑,通常沿磁力线方向沉积分布在铁谱片上,在铁谱显微镜下观察时一般呈银白色金属光泽。其长轴尺寸为 $0.5\sim 15\mu\text{m}$ 甚至更小,厚度在 $0.15\sim 1\mu\text{m}$ 。正常磨粒的示例,如图 5-5 所示。



(a) 正常磨粒1



(b) 正常磨粒2

图 5-5 正常磨粒的示例

5.3.2 切削磨粒

当设备因安装不对中或碎裂产生尖锐的刃边,该刃边穿入材料较软的摩擦表面,即可产生粗大的切削磨粒。切削磨粒一般呈现细长的形状,有明显毛刺,边缘带有黑色氧化

物,形状上大多呈现弯曲,长宽比一般大于 10 : 1。切削磨粒的示例,如图 5-6 所示。

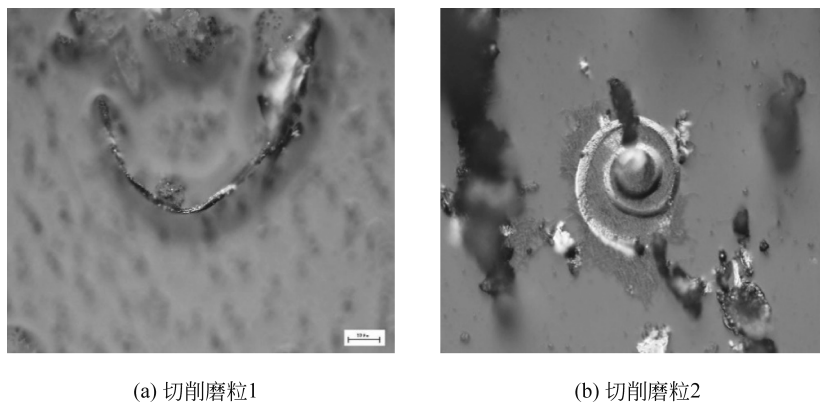


图 5-6 切削磨粒的示例

5.3.3 球状磨粒

滚动轴承和齿轮节线处产生疲劳破坏时,易产生球状磨粒。球状磨粒的直径多数为 $3\mu\text{m}$ 左右,具有明亮的中心和黑色环带。球状磨粒的示例,如图 5-7 所示。

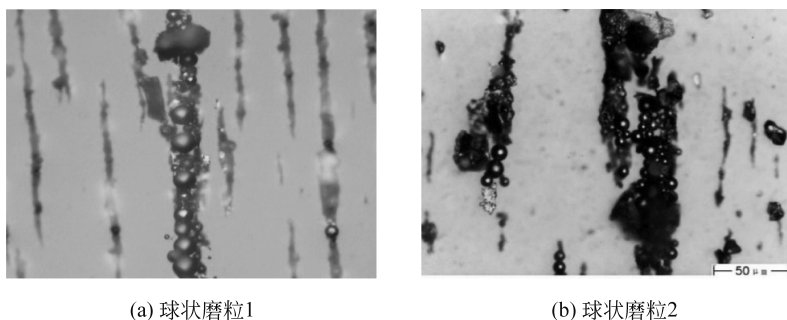


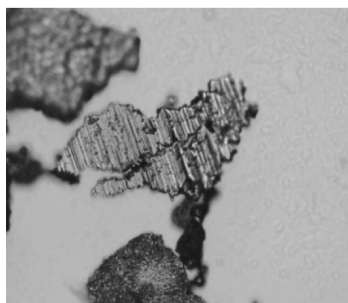
图 5-7 球状磨粒的示例(见彩插)

5.3.4 严重滑动磨粒

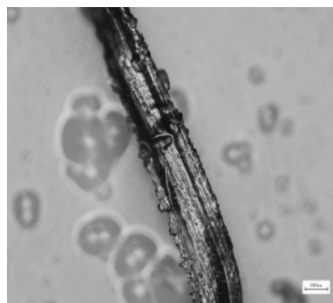
严重滑动磨粒表面常伴有明显划痕,长宽比一般小于 10 : 1(主要与切削磨粒区分),且划痕上附有黑色氧化物,呈现黑白相间的颜色分布。严重滑动磨粒的示例,如图 5-8 所示。

5.3.5 疲劳磨粒

一般来说,疲劳磨粒分为片状磨粒、块状磨粒和疲劳剥离。片状磨粒是尺寸较大的薄片,按磁力线分布;块状磨粒的厚度较大,表面纹理粗糙不平,并有不规则的条纹,磨粒轮廓不规则;疲劳剥离有随机曲折的边缘,形状因子不确定。疲劳磨粒的示例,如图 5-9 所示。

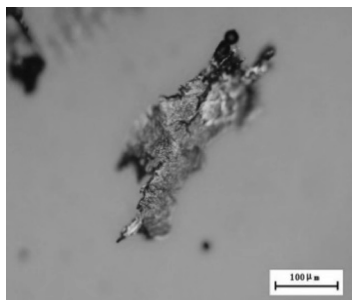


(a) 严重滑动磨粒1

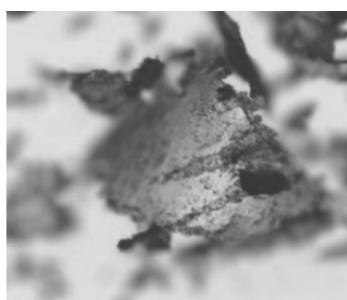


(b) 严重滑动磨粒2

图 5-8 严重滑动磨粒的示例



(a) 疲劳磨粒1

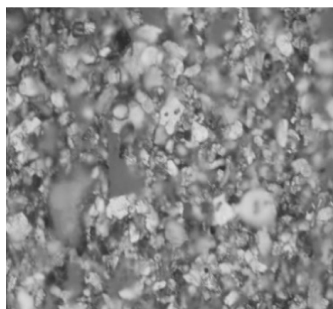


(b) 疲劳磨粒2

图 5-9 疲劳磨粒的示例

5.3.6 铜合金磨粒

铜合金磨粒在颜色上呈现金色,与同一张图片上的其他颗粒相比,颜色较亮,一般呈现散列分布。铜合金磨粒的示例,如图 5-10 所示。



(a) 铜合金磨粒1



(b) 铜合金磨粒2

图 5-10 铜合金磨粒的示例

5.3.7 黑色氧化物磨粒

黑色氧化物磨粒,一般是含有 Fe_3O_4 、 Fe_2O_3 和 FeO 的混合物,主要因为机械润滑不良或过热导致。外观为表面粗糙不平的颗粒,有时表面带有蓝色或橘红色小斑点。黑色氧化物磨粒的示例,如图 5-11 所示。

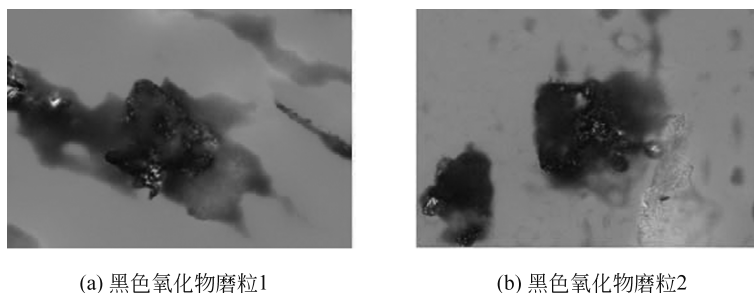


图 5-11 黑色氧化物磨粒的示例(见彩插)

5.3.8 红色氧化物磨粒

红色氧化物是金属铁和氧气在室温下的产物。红色氧化物磨粒的 Fe_2O_3 具有顺磁性,因此在强磁场中不沉积,分布在铁谱谱片上。红色氧化物磨粒的示例,如图 5-12 所示。

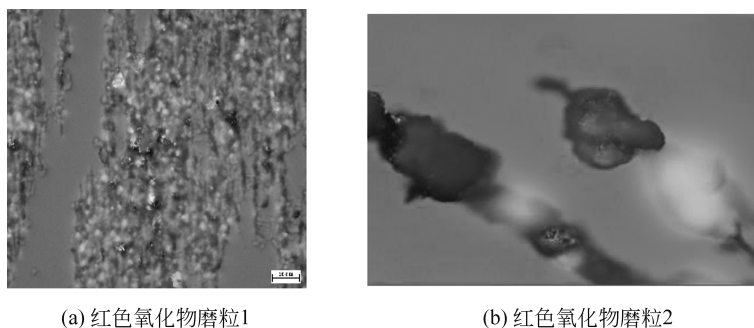


图 5-12 红色氧化物磨粒的示例(见彩插)

5.4 基于传统图像处理的磨粒特征计算

不同的磨粒有不同的颜色、形状、纹理等各方面不同的特征,这些特征与磨粒的形成过程具有较大的相关性。为了准确、有效地对磨粒进行分类、识别、检测和分割,需要分析不同类型的磨粒所对应的数字化特征及特征值。

5.4.1 磨粒的颜色特征

磨粒具有丰富的颜色,如红色氧化物表面一般呈现红色或暗红色,铜合金磨粒呈现黄色或亮黄色,球状磨粒呈现黑色或亮黑色等。对于 RGB 颜色空间,磨粒的颜色信息主要由每个像素点的 R、G、B 三通道信息表征。

磨粒图像每个像素点 R、G、B 三通道的值分别记录为 $f_R(i, j)$ 、 $f_G(i, j)$ 和 $f_B(i, j)$ 其中, f_R, f_G, f_B 分别表示位置 (i, j) 处的 R、G、B 各分量的值,取值范围为 $0 \sim 255$; $P_R(k)$ 、 $P_G(k)$ 、 $P_B(k)$ 分别表示 R、G、B 各分量的值落在第 k 级的像素比例, k 的取值范围为 $0 \sim 255$ 。颜色特征相关定义,如式(5-1)~式(5-6)所示。

$$\text{R 均值:} \quad u_R = \sum_{k=0}^{255} k P_R(k) \quad (5-1)$$

$$\text{R 标准差:} \quad \sigma_R = \left\{ \sum_{k=0}^{255} (k - u_R)^2 P_R(k) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5-2)$$

$$\text{G 均值:} \quad u_G = \sum_{k=0}^{255} k P_G(k) \quad (5-3)$$

$$\text{G 标准差:} \quad \sigma_G = \left\{ \sum_{k=0}^{255} (k - u_G)^2 P_G(k) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5-4)$$

$$\text{B 均值:} \quad u_B = \sum_{k=0}^{255} k P_B(k) \quad (5-5)$$

$$\text{B 标准差:} \quad \sigma_B = \left\{ \sum_{k=0}^{255} (k - u_B)^2 P_B(k) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5-6)$$

式(5-1)计算的是图像红色通道上的平均值,式(5-2)计算的是图像红色通道上的标准差,式(5-3)计算的是图像绿色通道上的平均值,式(5-4)计算的是图像绿色通道上的标准差,式(5-5)计算的是图像蓝色通道上的平均值,式(5-6)计算的是图像蓝色通道上的标准差。

颜色特征作为磨粒图的重要特征之一,若能正确地计算出磨粒的颜色特征值,则可以作为识别磨粒的手段之一。

5.4.2 磨粒的形状特征

数字图像中,形状是一条封闭曲线包围的区域。形状特征反映了磨粒组成部分的形态。磨粒形状特征主要包括:周长、区域面积、长短轴及比例、圆形度。

1. 周长

数字图像中,周长是使用相邻边缘点之间的距离之和表示的。常用的距离计算方法有以下两种。

(1) 欧几里得距离,在区域的边缘像素点中,像素与其水平或垂直方向上的相邻边缘像素点间的距离为 1,对角线方向上的距离为 $\sqrt{2}$ 。

(2) 8-邻域距离,指的是累加边缘点数得到的周长,与实际周长有差异,但计算方法简单。

对于图 5-13,带有阴影的像素为边缘检测的像素点,A 到 B 的欧几里得距离是 $5 + 4 \times \sqrt{2}$,A 到 B 的 8-邻域距离是 9。

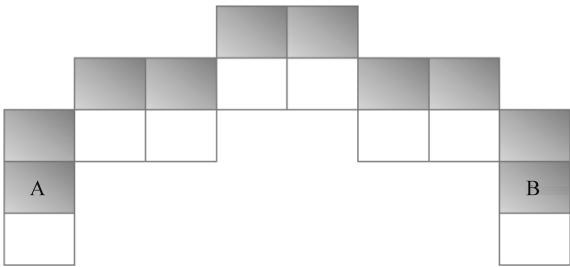


图 5-13 两种长度计算方法

2. 区域面积

区域面积指的是区域的大小。对于数字图像,区域面积一般定义为区域中的像素点个数。

3. 长短轴及比例

长轴指的是图像边缘上相隔最远的两点之间的线段长度。短轴指的是与长轴垂直的直线与边界相交最长的线段长度。长短轴比例指的是长轴与短轴的比值。

4. 圆形度

圆形度反映的是物体形状接近圆形的程度,其定义如式(5-7)所示。

$$C = \frac{4\pi A}{P^2} \tag{5-7}$$

其中,A 是目标所在区域的面积,P 是目标所在区域的周长。

5.4.3 磨粒的纹理特征

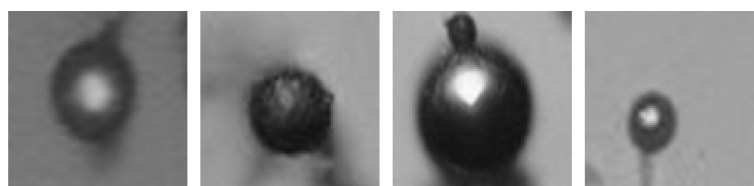
纹理是一种视觉特征,体现物体表面缓慢变化或周期性变化的表面结构和组织排列。通过像素点及其周围空间邻域的灰度分布体现的纹理是局部纹理,局部纹理在不同程度上的重复性是全局纹理。

数字图像中,常见的纹理特征包括:基于灰度共生矩阵的纹理特征、局部二值模式(LBP)、分形维数和 Tamura 粗糙度等。

5.4.4 磨粒特征计算示例

选取典型的磨粒图谱,包括球状磨粒、切削磨粒、疲劳磨粒、严重滑动磨粒、红色氧化物磨粒、铜合金磨粒和正常磨粒各四张,如图 5-14 所示。

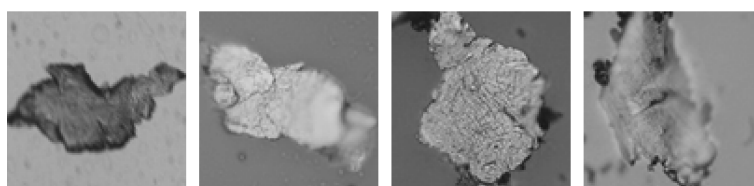
分别对每张磨粒图计算其颜色、形状和纹理特征,并进行比较分析。



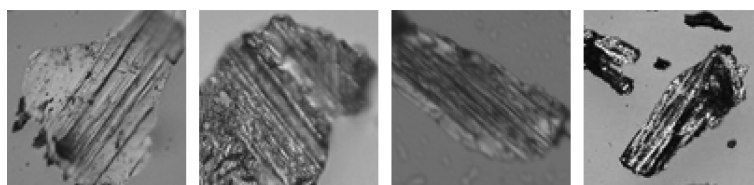
(a) 球状磨粒



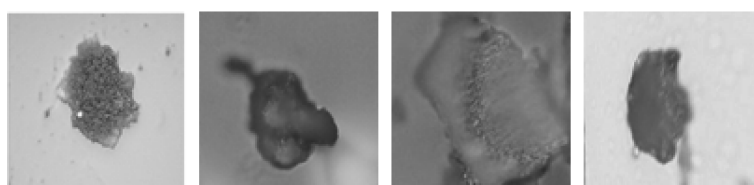
(b) 切削磨粒



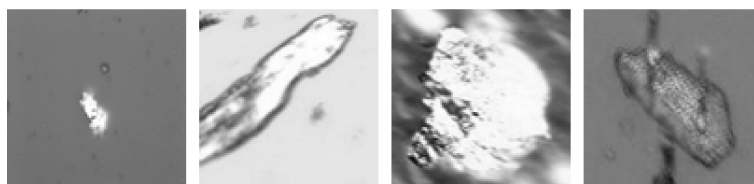
(c) 疲劳磨粒



(d) 严重滑动磨粒



(e) 红色氧化物磨粒



(f) 铜合金磨粒

图 5-14 典型磨粒图谱