

基于铁谱分析系统的机床健康检测

张扬龙

(通标标准技术服务有限公司福州分公司, 福建 福州 350001)

摘要: 对某机床厂的龙门导轨磨床 MMA52160A 利用铁谱分析技术的油样进行定期检测,及时地掌握龙门导轨磨床的磨损状况。通过实验与分析发现,在检测时间段内导轨磨床内部存在着正常磨损、切削磨损、滚滑复合磨损磨粒以及铁的氧化物,在数量上以正常磨损居多,其它类型磨粒数量较少,可以判断导轨磨床仍处于正常运行状态。实验表明,铁谱分析技术可以对机床的运行状态进行预报故障;同时,可合理地确定机床的换油周期,节省油料,做到科学润滑,以延长龙门导轨磨床的使用寿命。

关键词: 铁谱分析技术; 龙门导轨磨床; 油液检测; 磨损

中图分类号: TH17 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-4348(2014)03-0241-05

Study on machine tools state tests based on ferrography analysis system

Zhang Yanglong

(Fuzhou Branch, Tongbiao Standard Technology Service Co., Ltd., Fuzhou 350001, China)

Abstract: Due to wear between moving parts, wear particles are formed and would move into the lubrication system. The occurrence of the oily particles would reflect the situation of equipment failure. Ferrography was employed to make regular checks of the oil samples of the gantry rail grinder MMA52160A in certain Machine Tool Plant to determine the wear state of the machine tool to avoid abnormal wear. Several types of wear particles exist in the system, which may originate from normal wear, cutting wear, sliding and rolling composite wears or iron oxidation. The normal wear particles take the majority, indicating that the grinder is still in the normal running state. The experiment results show that ferrography can be used to predict the failures of the machine tools, to properly determine the lubrication changing period to save oil, and to extend the working life of the gantry rail grinder.

Keywords: ferrography; gantry rail grinder; oil monitoring; wear

机床作为金属毛坯成型加工的机器,在一般机械制造中所担负的加工工作量占机器总制造工作量的 40% ~ 60%,且工况复杂、价格昂贵^[1]。因此,定期对贵重机床设备进行检测,预测机床状态具有重要意义。目前,对机床零件实施定时在线检测有一定困难。但在机床润滑系统中,润滑油所携带的磨损颗粒是各运动表面产生磨损的产物,它们表征着机械设备是否产生失效和故障^[2],该技术被称作油样分析技术,常用的有光谱分析和铁谱分析技术,其中光谱分析技术的磨粒观察范围为 0.1 ~ 10 μm ,铁谱分析技术磨粒观察范围为 1 ~ 100 μm ,而机器在失效期所产生的磨粒尺寸大多在 20 ~ 100 μm ^[3],该范围是铁谱观察的子集,因此,铁谱分析可有效地应用于表面运动副的磨损类型、程度以及磨损部位的观察和分析中,从而进行机床状态预测,对机床及时有效地

收稿日期: 2014-06-06
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51305079);福建省高校产学研合作科技重大项目(2012H6003)
作者简介: 张扬龙(1977-),男(汉),福建永泰人,硕士,工程师,研究方向:机电系统测试与分析。

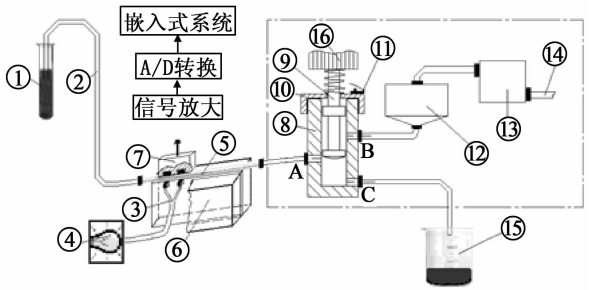
维护有着重要的价值和普遍的指导意义。

铁谱分析技术研究最终目标是推广应用,即通过观察磨粒的特征来判断机器是否正常磨损,并及时对机器是否失效提出预报。美国 Foxboro 公司首先开展铁谱技术研究,并成功应用于波音飞机故障预测,随后被国内外学者广泛关注,并开展理论、技术和应用研究^[4]。国内的许多学者也开展了相关的研究与应用推广,陈付梦、张云强等^[5-6]利用现代信息技术研究了铁谱图像的边缘检测与识别问题;张冠楠等^[7]则针对不同服役阶段润滑油的磨粒数量及大小进行研究,发现磨粒含量与服役时间成正比;徐为民^[8]、孙占红^[9]、张学丽^[10]等应用铁谱分析技术进行机械设备故障早期预测,杜绝了恶性故障。

本文以龙门导轨磨床 MMA52160A 为具体应用案例,介绍铁谱分析技术的原理、实验步骤,并运用铁谱分析技术分析导轨磨床在正常工作状态下系统的磨粒含量与变化趋势,实现对龙门导轨磨床的健康检测。

1 铁谱分析技术与原理

铁谱技术对磨粒的识别与分析分为定性和定量分析两种方式。前者称为分析式铁谱仪,后者是直读式铁谱仪,工作原理见图 1、图 2。



- 1. 样品油试管;2. 毛细管;3. 光纤;4. 光源;5. 沉积管;6. 磁体;
- 7. 光电传感器;8. 切换阀壳体;9. 切换阀柱塞;10. 切换阀盖;
- 11. 行程开关;12. 缓冲容器;13. 微量真空泵;14. 排气管;15. 废液杯;16. 虹吸按钮

图 1 直读式铁谱仪的工作原理图

Fig. 1 Working principle of direct reading ferrograph

铁谱分析有采样、制谱、观察与分析、结论四个基本环节^[11],取样瓶是铁谱分析的基本工具。图 4 即为装有油样的取样瓶,在瓶子的中间贴有标签,标签上写有取样的日期和被取样机床的型

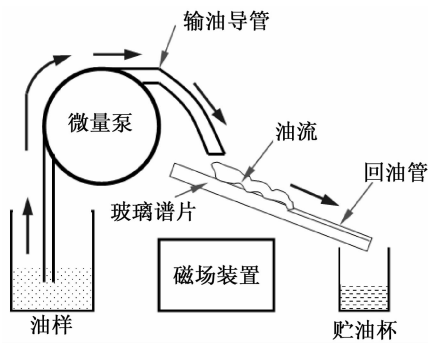


图 2 分析式铁谱仪工作原理简图

Fig. 2 Working principle of analytical ferrography

号等信息。如图 3 所示,为采样用的取样器,图 4 为实验采取的油样。



图 3 采样的操作

Fig. 3 The sampling operation



图 4 实验采集的油样

Fig. 4 The sampled oil of the experiment

通过直接读铁谱仪对图 4 的采样进行分析,获得大、小磨粒 D_L 、 D_S 值,其计算公式为:

$$D_i = \lg \left(\frac{I_0}{I_p} \right) = \lg \left(\frac{A_0}{A_0 - A_p} \right) \quad (1)$$

式(1)中, I_0 为清洁谱片的光亮度; I_p 表示磨粒沉积谱片的光亮度; A_0 表示光密度孔径面积; A_p 光密度孔径被磨粒遮盖的面积, i 指代 l (large)、 s (small)。为从数量上表征磨损变化程度和磨损速度,引入磨损烈度指数 L_D :

$$L_D = (D_L + D_S)(D_L - D_S) = D_L^2 - D_S^2 \quad (2)$$

总磨损量 $D_L + D_S$ 、磨损严重程度 $D_L - D_S$ 、累计总磨损 $\sum (D_L + D_S)$ 和累计磨损度 $\sum (D_L - D_S)$ 等铁谱分析参数。

2 实验对象与装置

实验对象是某机床厂正在生产过程中的 MMA52160A 型龙门导轨磨床,主要用于磨削各种形式的导轨和大平面,其实物图如图 5 所示。



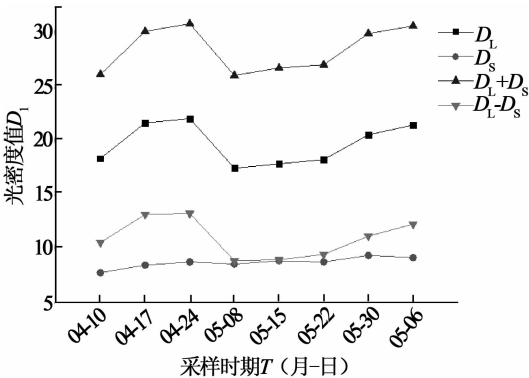
图5 龙门导轨磨床 MMA52160A

Fig. 5 Gantry guideway grinder MMA52160A

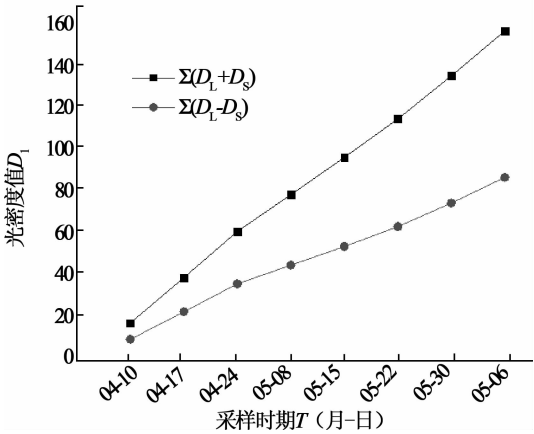
实验采用直读式铁谱仪的型号是 YTZ-5,分析式铁谱仪的型号是 YTF-5,包括铁谱仪主机、铁谱分析显微镜、YTF 系列图谱管理系统 3 部分。健康检测时间是从 2013 年 4 月 10 日到 6 月 5 日,每周定时、定点对 MMA52160A 磨床(机床的工作时间为每周 5 d8 h)的油样进行检测与分析,根据铁谱分析参数变化趋势分析与预测机床的健康状态。

3 龙门导轨磨床的油液分析

龙门导轨磨床 MMA52160A 的油样检测数据如表 1 所示,大小磨粒、总磨损量和磨损严重度数据变化在某一水平线上下浮动,呈现稳定系统的随机特征。为直观获取系统特征,用折线图绘制 D_L 、 D_S 、 $(D_L + D_S)$ 、 $(D_L - D_S)$ 的趋势图,见图 6(a),其中 D_L 和 D_S 值在分别 19.5、8.75 上下浮动,且磨粒总量保持稳定,没有出现突变,说明机床运转正常,处于正常磨损状态;图 6(b)为



(a) 磨损状态识别图



(b) 磨损程度识别图

图6 大小磨粒及总磨损量、磨损严重度的趋势分析图

Fig. 6 The trend analysis chart for large and small sized wear particles, the total wear amount and wear severity

$\sum (D_L + D_S)$ 、 $\sum (D_L - D_S)$ 变化曲线,两条直接呈现分散状态,由铁谱分析规律^[11-12]可知,在实验检测的时间段内该机床磨没有出现剧烈磨损现象。同时,结合表 1 中磨损烈度指数 L_D 的变化趋势,同样可以判断该机床磨损烈度稳定。

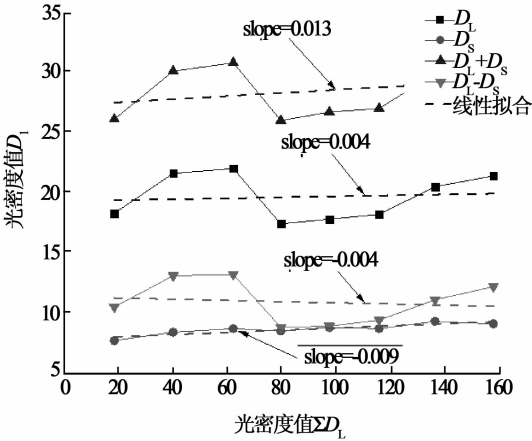
表1 龙门导轨磨床 MMA52160A 的油样监测直读数据记录

Tab. 1 The direct reading records of oil samples monitoring data for gantry rail grinder MMA52160A

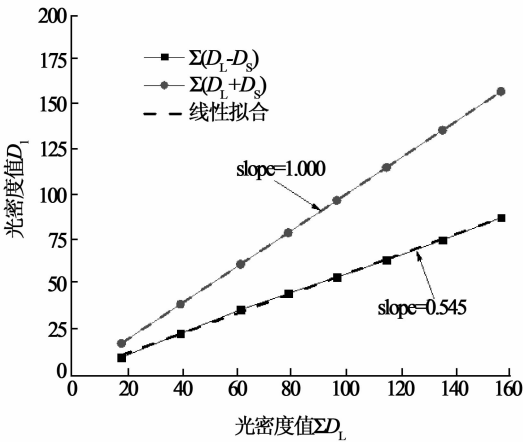
日期	D_L	D_S	$\frac{D_L + D_S}{D_S}$	$\frac{D_L - D_S}{D_S}$	L_D	$\frac{(D_L - D_S)}{(D_L + D_S)} / \%$
04-10	18.4	7.8	26.2	10.6	277.72	40.46
04-17	21.7	8.5	30.2	13.2	398.64	43.71
04-24	22.1	8.8	30.9	13.3	410.97	43.04
05-08	17.5	8.6	26.1	8.9	232.29	34.10
05-15	17.9	8.9	26.8	9.0	241.20	33.58
05-22	18.3	8.8	27.1	9.5	257.45	35.06
05-30	20.6	9.4	30.0	11.2	336.00	37.33
06-05	21.5	9.2	30.7	12.3	377.61	40.07

为更准确地描述磨损烈度变化及异常磨损状态的出现,本文以 $\sum D_L$ 作为时间横轴,绘制 D_L 、 D_S 、 $(D_L + D_S)$ 、 $(D_L - D_S)$ 、 $\sum (D_L + D_S)$ 、 $\sum (D_L - D_S)$ 随 $\sum D_L$ 的变化趋势,如图 7(a)、(b)所示,从图 7(a)趋势线的线性拟合结果可以发现: D_L 、 D_S 、 $(D_L + D_S)$ 、 $(D_L - D_S)$ 的线性拟合斜率分别为

0.004 01、0.009、0.013 01、-0.004 99,斜率值均在 0 值附近,说明系统并未出现磨损加剧的趋势;同时,从图 7(b) 趋势线的线性拟合结果可以发现: $\sum (D_L + D_S)$ 、 $\sum (D_L - D_S)$ 随 $\sum D_L$ 的变化趋势线的拟合斜率分别为 1 和 0.545 34,且几乎与实验数据相重合,直线的斜率未出现增加现象,说明检测时间段内机床仍保持正常运行状态,无异常磨损现象。



(a) D_L 、 D_S 、 $(D_L + D_S)$ 、 $(D_L - D_S)$ $V_S \sum D_L$



(b) $\sum (D_L + D_S)$ 、 $\sum (D_L - D_S)$ $V_S \sum D_L$

图 7 异常状态识别图

Fig. 7 The diagram of abnormal state identification

由于龙门导轨磨床具有很高的磨削精度,加工导轨和平面时的切削力又不大,所以其磨损也相对车床、铣床小很多。在 2 个多月的油液监测与分析中,大致观察到以下几种磨粒。

对比图 8 和图 9 可以发现,在监测过程中,磨床的磨粒类型分别为以下几种。

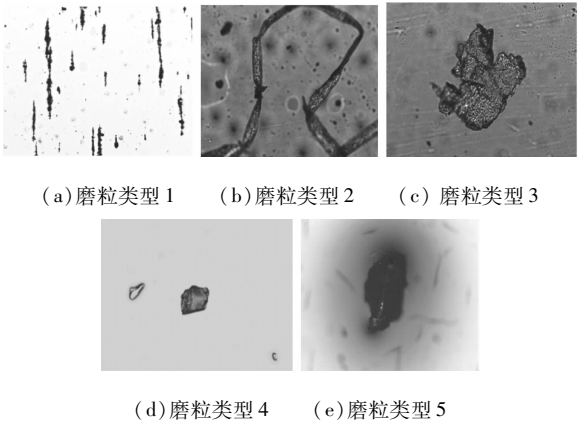
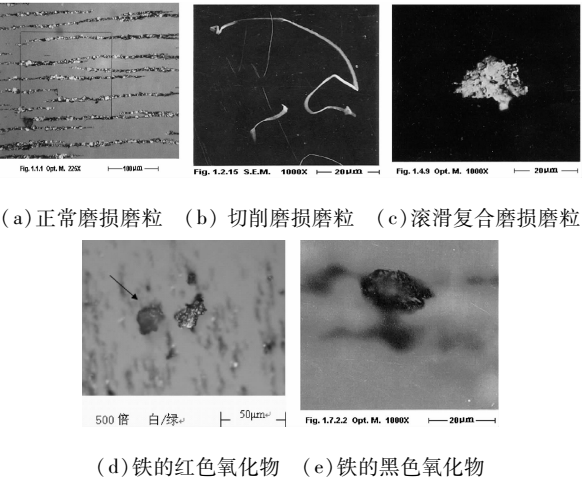


图 8 铁谱显微镜下观察到的不同磨粒形状(放大倍数均为 100 倍)

Fig. 8 The shape of different wear particle observed with an iron spectrum microscope (with a magnification of 100 times)



(d) 铁的红色氧化物 (e) 铁的黑色氧化物

图 9 铁谱分析系统里磨粒标准图谱

Fig. 9 The standard iron spectrum of wear particle with a ferrography analysis system

1) 正常滑动磨损磨粒,如图 8(a) 所示。该磨粒是运动摩擦副表面处于正常滑动磨损状态下,表层局部剥离而形成的一种磨粒。其外形呈鳞片状、表面光滑。正常磨粒大小和厚度分别为 15 - 0.5 μm 或更小 0.15 - 1 μm 。经对观察到的滑动磨粒外形和大小进行测量均与上述数据相符。

2) 切削磨损磨粒,如图 8(b) 所示。切削磨损磨粒的外形复杂,可呈曲线状、螺旋线状、环状和条状等。分析原因是因为零件安装不良造成尖锐的刃边,在发生相对运动时刃边刺入相对较软的滑动表面,形成一种类切削状态,因而切削磨损磨

粒通常外形粗大。

由于切削磨损是非正常磨损,因而切削磨损的磨粒属于非正常磨损磨粒,如果系统中出现大的切削磨损磨粒($50\text{ }\mu\text{m}$ 长)的数量不断增多,则预示零件可能发生磨损失效^[12]。通过实验观察与测量,切削磨损磨粒占磨粒总量比值极少,且经过测量大小均在 $10\sim 30\text{ }\mu\text{m}$ 之间,因此可以判断龙门导轨磨床 MMA52160A 内部未发生因切削磨损磨粒而造成的磨损。

3) 滚滑复合磨损磨粒,如图 8(c) 所示。这种磨粒在龙门导轨磨床的油液中较少出现,在数次铁谱观察中仅观察到个位数的该类型磨粒。

4) 铁的氧化物磨粒,如图 8(d)、(e) 所示,分别为红色氧化物和黑色氧化物。红色氧化物主要沉积在谱片入口处,它的产生表示润滑系统中存在水份;而黑色氧化物的出现则表明在磨粒产生过程中润滑不良以及存在过热。这两种磨粒在龙门导轨磨床的油液中都较为少见。

4 结论

1) 经过直读式铁谱仪分析后发现:其大小磨粒每过一周都会有小幅的增加,在第 4 次换油后突然下降,其后又呈现小幅上升的趋势,并没有发现异常磨损的出现,大小磨粒数目相对较少,机床

运行正常;同时可利用 $\sum D_L$ 下的分析数据的变化趋势更准确的描述机床的运行状态。

2) 经过分析式铁谱仪和铁谱显微镜观察后发现:出现在此磨床中的主要磨损是正常磨损,每次实验总会发现有正常磨损的出现,数量中等。同时也伴有少量的切削磨损,数量并不多。而滚滑复合磨损磨粒出现较少,只在连续运行较长时间后会出现此磨损。铁的氧化物磨粒更为稀少,只有微量。从观察到总体磨粒种类和数量来看,此磨床仍处于正常磨损状态,运转正常。

3) 龙门导轨磨床 MMA52160A 的运行状况良好,油液较为干净,磨损较少,无需经常换油。建议运行一两个月后对其油样进行铁谱分析,若出现异常磨损再对其进行换油操作。连续使用机床的时间不宜过长,在连续开机 $3\sim 4\text{ h}$ 后应关机保养。在每天使用后应对周围杂物进行清理,保持油箱周围环境的清洁,换油后应及时关闭油箱的盖子,防止灰尘等污染物进入油箱污染油液。

本文运用了铁谱分析技术解决了机床的健康检测与评定,但对实验过程中出现的少量异常磨粒无法进行定位判断,在后续的研究工作中,将结合 X 射线衍射技术,实现对出现的异常磨粒进行成份识别与判断,从而对即将失效的零部件提供有效的解决方案。

参考文献:

- [1] 恽达明. 金属切削机床机[M]. 北京:机械工业出版社,2010.
- [2] 温诗铸. 摩擦学原理[M]. 北京:清华大学出版社,1990.
- [3] 王立东,石成江. 光谱与铁谱的原理及其在设备诊断中的应用[J]. 哈尔滨轴承,2008,29(3):52-54.
- [4] Timothy N, Mark S. Analytical ferrography applied to driveline fluid analysis[J]. SAE International Journal of Fuels and Lubricants,2009,1(1):1480-1490.
- [5] 陈付梦,王静秋,张龙. 基于提升小波的铁谱图像边缘检测[J]. 机械科学与技术,2013,32(10):1466-1470.
- [6] 张云强,张培林,任国全,等. 曲波域铁谱磨粒图像特征提取方法研究[J]. 润滑与密封,2012,37(8):61-65.
- [7] 张冠楠,王晓丽,尹艳丽,等. 磨粒对不同服役阶段润滑油的摩擦学性能影响[J]. 中国表面工程,2012,25(3):98-103.
- [8] 徐为民. 运用铁谱技术监测内燃机车油润部件工作状态[J]. 铁道技术监督,2013,41(9):28-31.
- [9] 孙占红,佟风华,林有志. 铁谱分析技术在履带车辆检测中的应用[J]. 农业与技术,2009,129(3):185-187.
- [10] 张学丽,樊瑜瑾,翁家庆,等. 利用铁谱技术分析某柴油机的摩擦聚合物[J]. 机械管理开发,2008,23(1):53-56.
- [11] 毛美娟,朱子新,王峰. 机械装备油液监控技术与应用[M]. 北京:国防工业出版社,2006.
- [12] 杨其明. 磨粒分析-磨粒图谱与铁谱技术[M]. 北京:中国铁道出版社,2002.

(责任编辑:陈雯)