

基于光谱分析技术的磨损故障监测 影响因素分析

郎 宏, 佟文伟, 何 山, 刘宇佳

(中航工业沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)



郎宏(1976), 女, 高级工程师, 主要从事航空发动机传动润滑系统在用油液状态监控技术研究及试验分析工作。

收稿日期: 2012-06-26

摘要:采用转盘电极式原子发射光谱分析技术, 监测某型燃气轮机传动润滑系统磨损状况的发展变化趋势, 及时诊断早期磨损故障。为确保光谱分析技术监测的准确性, 着重研究了环境温度波动、标准曲线细化、样品黏度以及磨损颗粒尺寸等主要因素对测量结果的影响, 并简要阐述了光谱分析技术的基本原理。经大量研究试验表明: 光谱分析技术能够提前预报燃气轮机传动润滑系统可能发生的磨损故障, 是油液状态监控的 1 种有效手段。

关键词: 磨损故障; 光谱分析技术; 影响因素; 燃气轮机

Analysis of Influence Factors on Wear Failure Monitoring Based on Spectral Analysis Technology

LANG Hong, TONG Wen-Wei, HE Shan, LIU Yu-Jia

(AVIC Shenyang Engine Design and Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: The wear condition development trend in transmission and lubrication system of a gas turbine was monitored by RDE atomic emission spectrometric analysis technique and the early wear failure was diagnosed in time. To enhance the accuracy of spectral analysis technology monitoring, the main influence effects, such as the fluctuation of the environmental temperature, the standard curve drafting, the viscosity of the sample and the size of the wear particles were studied. The basic principle of spectral analysis technology was simply introduced. The research tests show that the spectral analysis technology can effectively forecast the premiere wear failure in transmission and lubrication system of gas turbine. It is an effective method to monitor oil condition.

Key words: wear failure; spectrometric analysis technology; influence factor; gas turbine

0 引言

燃气轮机使用的滑油犹如“血液”一样重要, 起着润滑、冷却、防锈、清洁和密封等多重作用。燃气轮机传动润滑系统中, 由于零件摩擦副的相互作用, 会产生许多细小的磨损颗粒, 这些磨损颗粒通常悬浮于油液中, 可能堵塞油滤、油喷孔, 使油压下降甚至导致轴承烧结、活门卡滞、密封性能下降等各种故障^[1-2]。统计资料表明, 在机械设备维修系统工作过程中, 磨损故障率占总故障率的 70% ~ 75%^[3], 主要表现为: 振动大、转速不正常、滑油消耗量过高、有杂音、抱轴、传动轴扭断等, 严重威胁运行安全, 同时也缩短了燃气轮机使用寿命, 造成巨大的经济损失和社会影响。有

效地分析出油液中磨损颗粒的种类、数量、成分及其变化规律, 就可以判断零件摩擦副的磨损趋势, 进行故障诊断^[4], 提前预报可能发生的故障, 提高设备运行的可靠性、安全性和维修水平^[5]。

光谱分析技术具有可在较短时间内同时测定 20 余种元素质量分数的特性, 其检测限可达 mg/kg 级。对于不同的研究对象, 可以从 20 余种元素中选取具有代表性的元素进行监测^[6-8], 通过趋势分析, 对早期磨损故障进行诊断。大量的科研实践表明, 光谱分析结果的准确性受多重因素的影响。

本文着重阐述环境温度、标准曲线绘制、样品黏度以及磨损颗粒尺寸等因素的影响, 并提出解决方法。

1 光谱分析原理

光谱分析是利用盘式电极旋转将油样携带至圆盘电极和静止的棒电极构成的固定缝隙之间,由 1 个电容所存储的电荷通过固定间隙放电,形成高温电弧,使部分油液汽化形成 1 个等离子区,释放出包含了润滑油中所含元素的发射光谱线,这些发射光谱线通过光学系统被分开,成为各自独立的特征光谱线,根据物质发射光谱的波长和强度就可以相应的测出物质元素的成分和质量分数。

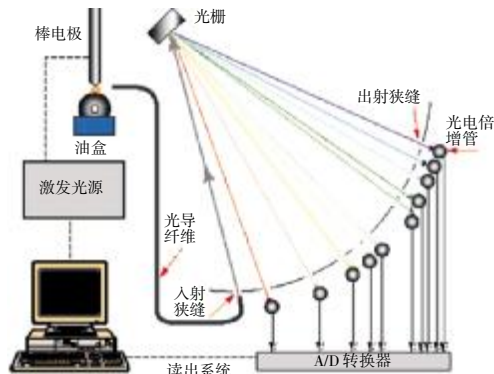


图 1 转盘电极式原子发射光谱分析

2 主要影响因素分析

2.1 环境温度

光谱仪由许多光学原件组成,很小的温度变化都会使光学系统成像移位,检测结果的准确性和重复性将受到影响。通过在试验环境温度变化 0~2℃、2~4℃、4~6℃时,测定已知浓度的标准油液,以 Fe 元素为例考察环境温度变化对测定结果的影响。测定 10 mg/kg 标准油液结果见表 1,温度变化对 Fe 测试结果的影响如图 2 所示。此方法允许 Fe 元素在 10 mg/kg 时,准确性为 10±2.21 mg/kg,其重复性(相对标准偏差)不超过 0.71。

表 1 试验环境温度变化时的测定结果

温度变化 /℃	10 mg/kg 标油 Fe 元素质量分数								重复性
0~2	10.12	9.93	10.03	9.82	9.98	10.06	10.07	10.10	0.10
2~4	9.65	9.22	10.26	10.84	10.58	10.20	11.03	9.32	0.68
4~6	12.07	12.04	12.88	12.03	7.75	8.22	11.99	7.52	2.29

当温度变化在 0~2℃时,所测数据稳定,重复性在允许范围内;当温度变化在 2~4℃时,所测数据波动大,但准确性、重复性都在允许范围内;当温度

变化在 4~6℃时,所测数据波动较大,准确性很差,重复性超过允许范围。试验结果表明温度对仪器的稳定性影响较大,应尽量控制试验环境温度变化在 0~4℃,保证数据准确性、重复性。

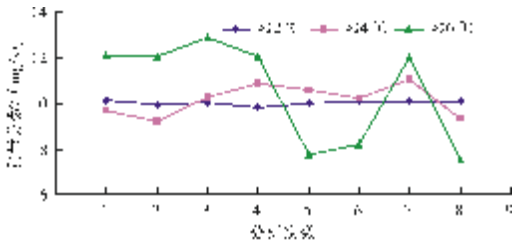


图 2 温度变化对 Fe 测试结果的影响

2.2 标准曲线绘制

仪器出厂时的原始标准曲线通常以 0、50、100、300 mg/kg 的质量分数和光强值为坐标点进行绘制。对于燃气轮机来说,磨损元素质量分数都比较低,而仪器在测试过程中也受到多重因素影响,适当增加 3、5、10、30 mg/kg 的标准油液的数据,对标准曲线进行细化,以考察对分析结果的影响。将细化后与原始标准曲线进行比较,以 Ag 元素为例,标准曲线精细化前后对比如图 3 所示。

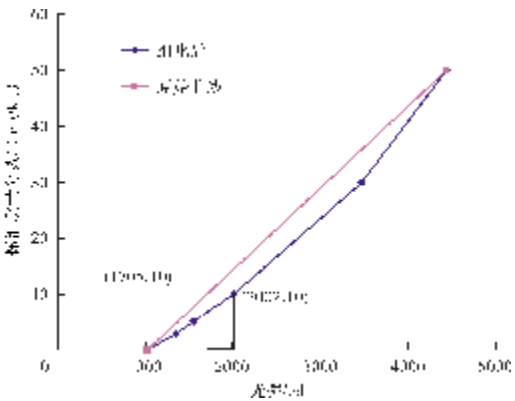
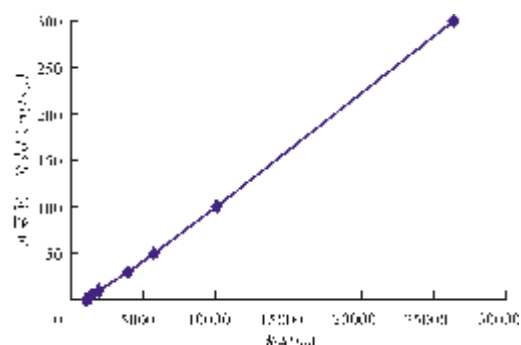


图 3 标准曲线精细化前后对比

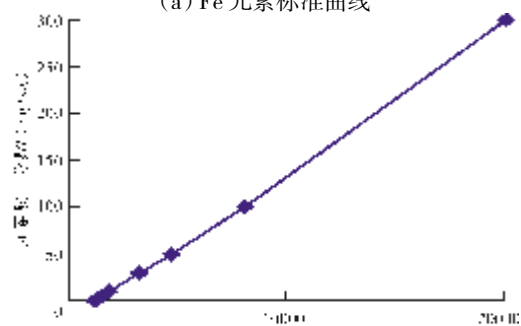
各元素的标准曲线如图 4 所示。从图中可见,当质量分数为 10 mg/kg 时,原始曲线对应的光强值为 1705 cd,而细化后曲线对应的光强值为 2002 cd,二者结果有很大差别,细化后曲线对应的光强值更接近真实值。以部分元素为例,标准溶液的光强值见表 2。

2.3 样品黏度

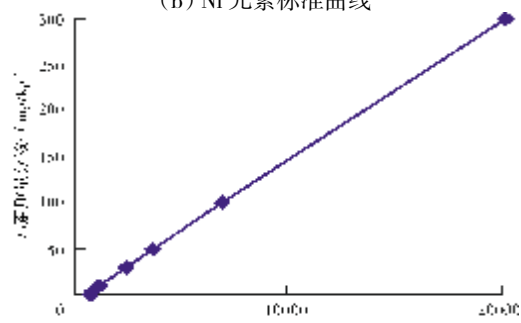
样品的分析结果以 mg/kg 为单位表示,参与分析样品的质量对分析结果有很大影响。在分析过程中,应尽量使转盘电极旋转时带上的样品的质量是相同



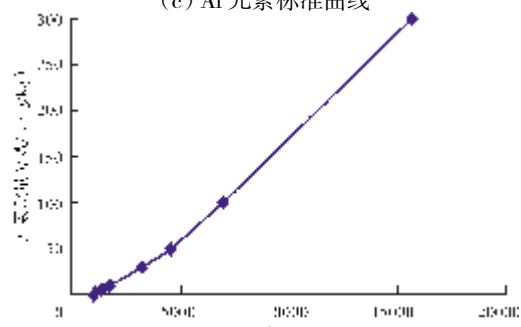
(a) Fe 元素标准曲线



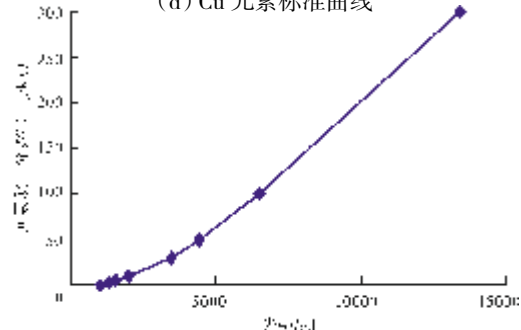
(b) Ni 元素标准曲线



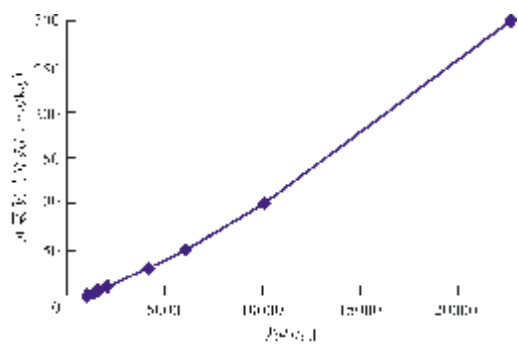
(c) Al 元素标准曲线



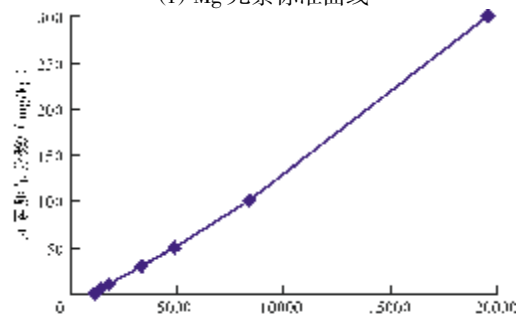
(d) Cu 元素标准曲线



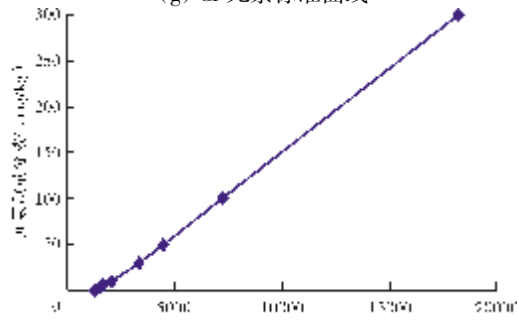
(e) Ag 元素标准曲线



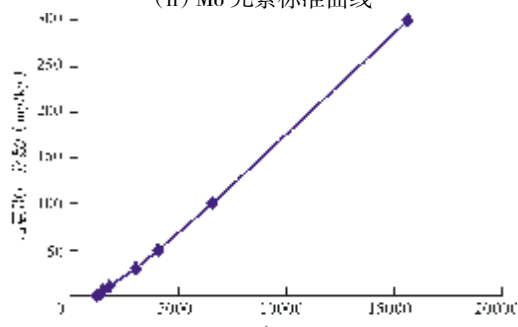
(f) Mg 元素标准曲线



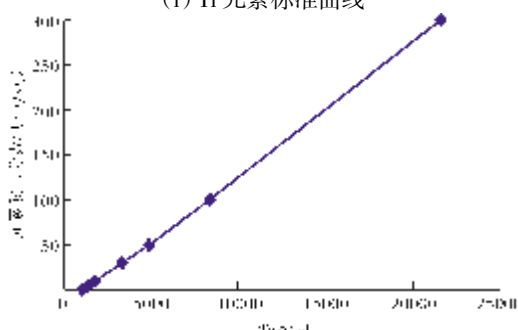
(g) Cr 元素标准曲线



(h) Mo 元素标准曲线



(i) Ti 元素标准曲线



(j) Si 元素标准曲线

图4 各元素的标准曲线

表 2 标准溶液的光强					cd
质量分数	Fe	Ni	Al	Cu	Ag
0	1012	1189	713	1042	1028
3	1303	1366	830	1126	1347
5	1479	1520	941	1412	1544
10	1939	1849	1206	1768	2002
30	3884	3285	2416	3241	3470
50	5701	4744	3725	4577	4440
100	10016	8156	6964	7004	6498
300	26396	20166	20230	15663	13416

质量分数	Mg	Cr	Mo	Ti	Si
0	1052	1092	1268	1222	1065
3	1390	1281	1520	1405	1276
5	1585	1441	1678	1527	1436
10	2102	1806	2064	1823	1788
30	4198	3329	3369	3041	3325
50	6081	4846	4488	4092	4840
100	10080	8353	7263	6583	8356
300	22700	19586	18220	15643	21583

的。如果样品的黏度差别较大,转盘电极旋转时,带上样品的质量不同,将影响分析结果的准确性。因此样品应尽量和标油的黏度保持一致,若样品黏度过大,可采取加温或稀释的方法,来消除黏度的影响。

2.4 磨损颗粒尺寸

油液光谱分析通过盘电极旋转将油液中磨损颗粒带至分析间隙处进行激发,当磨损颗粒直径大于 10 μm 时,颗粒质量过大,在盘电极旋转时,不能够完全都被盘电极带至分析间隙处,或颗粒带至分析间隙处后不能完全汽化,导致分析结果平行性差,不能准确反映样品中磨损颗粒质量分数。在早期磨损中,产生的磨损颗粒以小于 10 μm 为主,当大于 10 μm^[9-10]的颗粒数量迅速增长时,磨损加剧,光谱分析数据的平行性受到很大影响,说明已经不是早期磨损了,开始演变成为磨损故障,应采用其他方法进行监测分析。

2.5 其他

利用光谱分析技术监测燃气轮机磨损故障时,除上述主要影响因素以外,还有盘电极背景、棒电极切削角度、样品均匀性、石英窗清洁度等因素,也会影响分析结果的准确性,可在实际工作中通过规范流程有效规避。

3 应用案例

对某燃气轮机传动润滑系统使用的滑油进行监测,定期对滑油取样进行光谱分析,以及时了解设备运行状况。其中某阶段光谱分析结果见表 3。

表 3 标准溶液的光强					cd
序号	Fe	Ni	Al	Cu	Ag
1	0.35	0.46	0.40	0.08	0.13
2	0.66	0.68	1.20	0.13	0.13
3	0.65	0.29	0.79	0.22	0.08
4	1.75	0.49	1.09	0.18	0.13
5	1.38	0.31	0.8	0.17	0.12
6	2.26	0.29	1.08	0.29	0.14
7	2.41	0.28	0.73	0.11	0.12
8	4.57	0.25	0.68	0.37	0.5
9	12.25	0.53	1.38	0.73	0.35
告警值	5.0	1.5	1.5	2.0	1.5
极限值	10.0	3.0	3.0	4.0	3.0

序号	Mg	Cr	Mo	Ti	Si
1	0.10	0.35	0.79	0.93	20.53
2	0.08	0.60	0.87	2.13	21.66
3	0.03	0.46	0.41	0.85	23.19
4	0.08	0.72	0.33	0.88	23.73
5	0.23	0.62	0.23	0.64	22.39
6	0.32	0.59	0.23	0.81	24.58
7	0.06	0.75	0.26	0.65	20.94
8	0.11	1.33	0.34	0.57	27.19
9	0.29	1.97	0.66	3.96	52.62
告警值	1.0	1.0	1.0	4.0	—
极限值	2.0	2.0	2.0	6.0	—

在燃气轮机运转初期,光谱的分析结果都比较低,而且各元素的值都比较稳定。在某阶段的第 2 次样品光谱值的 Ti、Al 突然偏高,对样品进行 2 次取样分析,光谱值明显降低,查找原因,发现是取样方式不规范,造成样品 2 次污染,改进取样方式后,未出现此类问题。Fe 元素磨损趋势曲线如图 5 所示,随着运转时间的延长,Fe 元素光谱值缓慢增长,在第 6 次时,Fe 元素质量分数达到 2.26 mg/kg,但其他元素未见明显增长,对样品进行 2 次取样分析,Fe 元素质量分数与前一次的值比较接近,表明样品没有被 2 次污染,由于样品 Fe 元素的光谱值有增长的趋势,应进行关

注。在第8次时,Fe元素光谱值升高明显,缩小取样时间间隔取样,Fe浓度猛增到12.25 mg/kg,数据超过极限值,平行性较差,同时伴随Cr、Ti、Al元素质量分数的增长,说明传动润滑系统发生了异常磨损。依据传动润滑系统的零件结构与使用材料,综合诊断为封严篦齿发生了磨损故障。燃气轮机分解后,发现封严篦齿发生严重的磨损,篦齿附近的主轴承发生轻微磨损,与诊断情况相符。

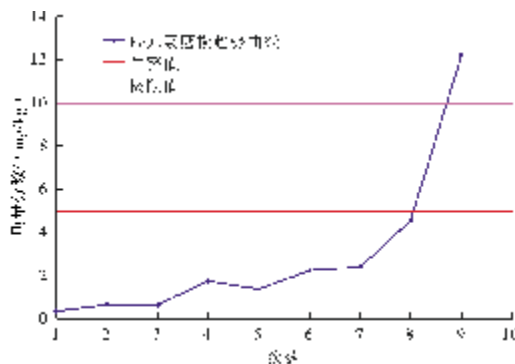


图5 Fe元素磨损趋势曲线

通过对油液进行光谱监测,提前发现了传动润滑系统的早期磨损,确定了磨损部位,有效的避免异常磨损的恶化,及时更换发生磨损的零件,减少了燃气轮机停机检修的时间,在避免了主轴承灾难性损失的同时,创造了更大的经济效益。

4 结束语

应用光谱分析技术对燃气轮机传动润滑系统进行监测,能够及时了解零件磨损变化的趋势,结合系统结构和材料使用情况,对可能发生的磨损故障进行预先诊断,提高了燃气轮机运行的可靠性和安全性,是燃气轮机早期磨损故障不可缺少的监测技术手段。光谱分析的影响因素很多,主要有环境温度、标准曲线绘制、样品粘度以及磨损颗粒尺寸等,对这些因素进行严格的控制,可有效提高早期磨损故障监测结果的准确性,对确保燃气轮机安全、可靠运行有重要意义。

参考文献:

- [1] 高经纬,张培林,张英堂,等. 某型柴油机磨损特点及油液光谱分析诊断研究[J]. 内燃机学报,2004,22(6):571-576.
GAO Jingwei, ZHANG Peilin, ZHANG Yingtang, et al. Study on wearing characteristics and diagnosis based on oil spectrum

- analysis [J]. Transactions of CSICE,2004,22 (6):571-576.(in Chinese)
- [2] 张晶,朱子新,陈栋,等. 原子发射光谱技术在航空发动机磨损失效分析中的应用 [J]. 失效分析与预防,2007,2(2):62-64.
ZHANG Jing, ZHU Zixin, CHEN Dong, et al. Applications of atomic emission spectrometric techniques on wear failure analysis of aircraft engine [J]. Failure Analysis and Prevention, 2007,2(2):62-64. (in Chinese)
- [3] 郑长松,马彪,马源. 基于油液光谱分析的综合传动状态监测试验研究[J]. 光谱学与光谱分析,2009,29(3):749-751.
ZHENG Changsong, MA Biao, MA Yuan. Test research on state monitor of PSST by oil spectrometric analysis [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2009,29(3):749-751. (in Chinese)
- [4] 盛晨兴,严新平,徐泰富. 基于油液分析的柴油机可靠性试验磨损评价研究[J]. 摩擦磨损学报,2008,28(6):556-560.
SHENG Chenxing, YAN Xinping, XU Taifu. The study of wear evaluation in reliability test of diesel engine based on oil analysis[J]. Tribology,2008,26(6):556-561. (in Chinese)
- [5] 许斌,余学军. 油液分析技术在设备维修中的应用与研究 [J]. 润滑油,2006,21(2):61-64.
XU Bin, YU Xuejun. The application and study of oil analysis in equipment maintenance [J]. Lubricating Oil,2006,21(2):61-64. (in Chinese)
- [6] 黄云水,徐建明,黄雄. 12V135 柴油机油液原子光谱分析诊断研究[J]. 中国修船,2010,23(4):12-15.
HUANG Yunshui, XU Jianming, HUANG Xiong. Analysis and diagnosis to atomic spectrum for oil in 12V135 [J]. China Shiprepair,2010,23(4):12-15. (in Chinese)
- [7] 费逸伟,张冬梅,姜旭峰. 油液监测技术及其在航空发动机故障诊断中的应用[J]. 航空发动机,2004,30(3):45-48.
FEI Yiwei, ZHANG Dongmei, JIANG Xufeng. Application of oil monitoring technology to aeroengine fault diagnosis [J]. Aeroengine,2004,30(3):45-48.(in Chinese)
- [8] 刘瑜,谭振东,王振涛. 基于油液光谱数据的船机电设备磨损元素相关性分析[J]. 润滑与密封,2010,35(10):112-114.
LIU Yu, TAN Zhendong, WANG Zhentao. Correlation analysis on wear elements of marine mechanical and electrical equipments based on spectral data[J]. Lubrication Engineering, 2010,35(10):112-114.(in Chinese)
- [9] 徐金龙,栗斌,程琛. 光谱和铁谱及自动磨粒激光技术在油液监测中的应用[J]. 润滑与密封,2009,34(9):105-109.
XU Jinlong, SU Bin, CHENG Chen. The application of spectrum and ferrography technology and laser net fines in the used lubricating oil monitoring [J]. Lubrication Engineering, 2009,34(9):105-109. (in Chinese)
- [10] 王国庆. 润滑油液监测技术现状与发展 [J]. 润滑油,2004,19(5):7-11.
WANG Guoqing. The present status and development of lube oil[J]. Lubricating Oil,2004,19(5):7-11.(in Chinese)