

燃油中颗粒物污染物在线测量技术研究

李宇¹, 张嘉皓¹, 杨昊宗^{2,3}, 徐日辛^{2,3}, 王法全¹, 周骛^{2,3}

(1. 中国航发控制系统研究所, 无锡 214125)

(2. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

(3. 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室, 上海 200093)

摘要: 燃油系统抗污染试验中污染物种类复杂、粒径范围宽, 导致难以实现在线监测。对此, 提出一种基于光谱消光法的燃油污染物质量浓度在线测量方法。首先, 基于 Lambert-Beer 定律建立光谱消光测量值 $\ln(I_0/I)$ 与颗粒质量浓度的理论关系, 并通过实验标定获得光谱强度与质量浓度的线性标定模型, 同时对标定结果进行验证; 随后, 将该方法应用于工业现场开展燃油污染物浓度的在线测量, 并与滤膜称重法进行对比评估。结果表明: 实验标定阶段光谱消光法的污染物浓度测量相对误差不超过 $\pm 5\%$, 现场应用中其测量结果与滤膜称重法相比的相对误差在 10% 以内。该方法能够实现燃油中污染物质量浓度的准确在线测量, 为燃油系统污染评估提供了有效的技术手段。

关键词: 燃油; 污染物; 在线测量; 消光法; 浓度

中图分类号: V263.6

文献标识码: A

Research on online measurement technology for particle pollutants in fuel

LI Yu¹, ZHAGN Jiahao¹, YANG Haozong^{2,3}, XU Rixin^{2,3}, WANG Faquan¹, ZHOU Wu^{2,3}

(1. AECC Aero-engine Control System Institute, Wuxi 214125, China)

(2. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

(3. Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer for Power Engineering, Shanghai 200093, China)

Abstract: To address the difficulty of online monitoring caused by the diverse types and wide size distribution of contaminants in fuel system anti-contamination tests, this study proposes an online measurement method for contaminant mass concentration in fuel based on spectral extinction. The method establishes a theoretical relationship between the measured spectral extinction value $\ln(I_0/I)$ and particle mass concentration using the Lambert - Beer law, followed by experimental calibration to obtain a linear model between spectral intensity and mass concentration. The calibration was then validated, and the proposed method was further applied to industrial field tests, where its performance was compared with that of the membrane gravimetric method. The results show that the relative measurement error of the spectral extinction method does not exceed $\pm 5\%$ during calibration, and its relative error remains within 10% in industrial field applications. The proposed method enables accurate online measurement of contaminant mass concentration in fuel and provides an effective technical approach for fuel contamination evaluate.

Key words: fuel; pollutant; online measurement; extinction method; concentration

收稿日期: 2025-11-25; 修回日期: 2026-03-30

通信作者: 周骛(1986—), 女, 博士, 教授。E-mail: zhouwu@usst.edu.cn

引用格式: 李宇, 张嘉皓, 杨昊宗, 等. 燃油中颗粒物污染物在线测量技术研究[J]. 航空工程进展.

LI Yu, ZHAGN Jiahao, YANG Haozong, et al. Research on online measurement technology for particle pollutants in fuel[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering. (in Chinese)

0 引言

据统计,70%~80%的飞机液压部件损坏是油液污染所造成的,约60%的航空发动机故障是燃油中固体颗粒物污染或燃油中的水结冰所造成^[1-2]。以航空燃油为例,颗粒污染物主要来源于因零部件中元件腐蚀、疲劳、磨损剥落的金属颗粒;油品在搬运、加工、储存等过程中接触到的输油管道、擦片的金属颗粒;贮油罐中的钢锈、阀、油泵和工件机械运动时产生的金属粉末粒;空气中的粉尘以及游离水等。它们的存在最终会导致设备机械性能下降、调速系统卡涩、燃油控制系统中的油滤或喷嘴堵塞、阀门卡死、油泵性能下降或失效等状况^[3-5],严重影响燃油控制系统的工作寿命和可靠性,从而极大地危害发动机正常工作。在航空发动机研发过程中需要对燃油系统进行抗污染实验,通过配制一定浓度的标准污染物^[6],观察燃油系统在各种负荷下的运行情况和燃油滤清器的工作效率,因此需要在线获取污染物的浓度。

油液中污染物浓度有许多测量方法,目前国内外主流测量方法有滤膜称重法、颗粒计数法、成像法和铁谱等。其中滤膜称重法检测是燃油中最常用的污染物测量方法,其测量结果可信度和真实性较高,且检测结果不受颗粒物的物理特性、化学成分等因素的影响^[7-8],但滤膜采样称重法也存在许多缺点,例如测量过程繁琐复杂、实验时间长、易受人为因素影响,通常只用于实验室离线测量。光阻法颗粒计数器通过检测颗粒通过光束时引起的光强衰减来计算颗粒数量与尺寸,其设备简单、精度高^[9-10],但无法适应原位全流量测量,且管道容易堵塞。成像是通过对颗粒进行成像,使用传统图像处理或深度学习识别^[11-13],具有直观等特点,但对于宽粒度分布的污染物如果仅使用单镜头方案无法覆盖测量范围,且对于原位测量会出现颗粒离焦现象。铁谱仪测量精度高,可以分析颗粒的形貌、大小和浓度^[14-15],但只适用于铁及其氧化物,对于粉尘等物质无法测量。

受上述研究启发,结合航空发动机抗污实验的要求,本文首先分析消光法浓度检测原理,并推导在污染物种类、颗粒粒径分布已知情况下颗粒污染物消光值和污染物浓度的线性关系;形成消光光谱法浓度在线测量系统,并对其进行污染物浓度标定和验证,最后应用在燃油系统抗污染

实验。

1 消光法浓度测量原理

消光法浓度检测的基本原理为 Lambert-Beer 定律。当一束光强为 I , 波段为 λ 的平行光照射到厚度为 L 的悬浮颗粒时,颗粒对入射光的吸收和散射作用将使其对光强产生衰减(如图 1 所示),其衰减量满足公式(1)^[16]。

$$-dI = I_0 \tau dL \quad (1)$$

式中: τ 为颗粒系溶质介质的浊度; L 为入射光通过颗粒系溶质的距离。

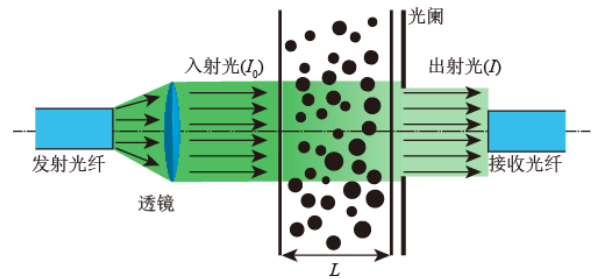


图1 光谱消光法检测装置构造原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the structure of the spectral extinction method detection device

当知道颗粒粒径分布和密度时,可得到颗粒数量与质量浓度的关系:

$$\begin{cases} C_V = \frac{\pi \cdot N \cdot D^3}{6} \\ C_m = \rho_w \cdot C_V \\ N = \frac{6C_m}{\pi D^3 \rho_w} \end{cases} \quad (2)$$

式中: C_V 为体积浓度,即单位体积内的颗粒总体积,单位 m^3/L ; C_m 为质量浓度,即单位体积内的颗粒质量,单位 mg/L ; D 为颗粒粒径,单位 μm ; ρ_w 为颗粒密度。

根据发动机燃油系统抗污染实验标准^[4],在实验中加入的污染物是标准颗粒污染物,即污染物种类、颗粒粒径分布和污染物配比是已知的,则可简化消光法浓度测量,根据 Lambert-Beer 定律和式(2)可推导出以下关系式:

$$\begin{aligned} \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) &= -\frac{\pi}{4} L \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} K_{ext}(\lambda, m, D) \frac{6C_m}{\pi D^3 \rho_w} D^2 dD = \\ &= -\frac{3}{2} L \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} K_{ext}(\lambda, m, D) \frac{6C_m}{\pi D^2 \rho_w} dD = -\kappa \cdot L \cdot C_m \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $K_{ext}(\lambda, m, D)$ 为消光系数; λ 为入射光波长; m 为相对折射率。

当测量光程 L 固定,即测量装置相对位置不变时,理论上 $\ln(I_0/I)$ 与颗粒质量浓度存在线性关系:

$$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right) = \kappa \cdot C_m \quad (4)$$

式中: k 为线性系数,可通过实验标定获取。

2 系统标定及验证

2.1 测量系统标定平台

燃油污染物浓度测量标定平台主要构成为一体式测量装置、集成机箱和循环分散系统等。一体式测量装置包括光谱信号接收口、发射口、准直透镜和石英测量段。集成机箱包括了光谱仪、光源等。系统实物图如图2所示。由于在线测量对信号采集设备要求较高,因此本文使用空间体积较小和采集速度较高的光谱仪采集数据,同时设计文丘里形石英测量段目的是减少污染物沉积或粘附在石英玻璃表面^[17]。

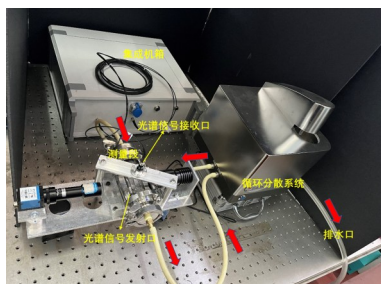


图2 测量装置标定平台

Fig. 2 Measuring device calibration platform

2.2 光谱消光法污染物质量浓度测量系统标定

根据航空飞机抗污染试验标准的污染物成分配比^[8]和上述标定实验台的搭建方法,值得注意的是,按照标准在测试开始时应确保标定和实测过程中介质温度保持在25℃左右,目的是避免介质温度改变影响测量对象的折射率等。分别标定9组不同浓度的污染物,浓度标定范围为7~100 mg/L,由于燃油中污染物浓度大部分是小于20 mg/L的,因此实验中选择的浓度标定点大部分在7~15 mg/L,大于30 mg/L浓度每隔为20 mg/L取一个,具体污染物配比如表1所示。

表1 污染物浓度及配比
Table 1 Pollutant concentration and ratio

质量浓度/ mg·L ⁻¹	Fe ₂ O ₃ -1/ mg	Fe ₂ O ₃ -2/ /mg	Fe ₃ O ₄ /mg	粉尘 /mg	石英颗 粒/mg
7	0.07	1.35	0.07	0.40	0.20
9	0.10	1.74	0.10	0.51	0.26
11	0.12	2.14	0.12	0.63	0.32
13	0.14	2.51	0.14	0.74	0.37
15	0.16	2.89	0.16	0.86	0.43
30	0.32	5.78	0.32	1.71	0.85
50	0.54	9.64	0.54	2.86	1.42
80	0.86	15.42	0.86	4.57	2.27
100	1.07	19.28	1.07	5.71	2.84

燃油污染物重量浓度检测系统标定步骤如图3所示,具体如下:

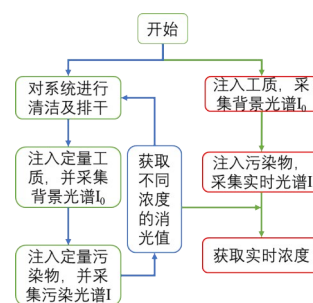


图3 测量系统标定及检测流程

Fig. 3 Measurement system calibration and testing process

- 1) 按照配比用微量天平称取固体颗粒污染物;
- 2) 对循环分散系统进行清洁及排干工质污染物;
- 3) 用量筒量取定量的纯净工质并注入循环分散系统;
- 4) 采集原始光谱 I_0 ,如图4蓝线;
- 5) 分别加入五种污染物,待光谱稳定后采集有污染物的光谱 I ,如图4黑线;
- 6) 重复步骤a→e,直至标定完所有浓度;
- 7) 采集完标定数据后,开始进行数据处理,首先对 I_0 和 I 进行平均去噪处理,并获得该浓度下的各波长的消光比,如图4红线所示。
- 8) 选取有较高灵敏度的波长,如图4红线所示,在波长500~700 nm波段其灵敏度较高。得到每个浓度下固定波长范围内的平均 $\ln(I_0/I)$,然后进行最小二乘法线性拟合,获取 $\ln(I_0/I)$ 与质量浓

度的关系。注意:为了避免人为因素,每个浓度进行重复性实验3次,每次由不同人员进行称取污染物。

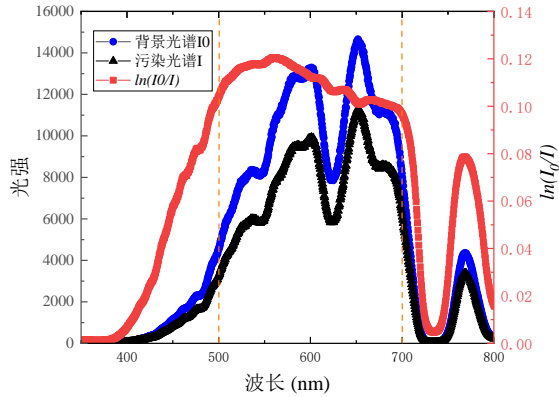


图4 典型光谱曲线和消光曲线

Fig. 4 Typical spectral curves and extinction curves

最后通过上述处理方法,标定结果如图5所示。经过三次重复性实验,发现三次标定曲线基本一致,考虑到随着浓度增大,其颗粒群会出现复散射^[14],会造成浓度和消光值偏离线性,且考虑测量过程中实际的浓度范围(小于20 mg/L),本文采用7~50 mg/L之间的标定点来拟合曲线,如图5中小图所示,可以看出:标定浓度过大时,其线性拟合效果较差。

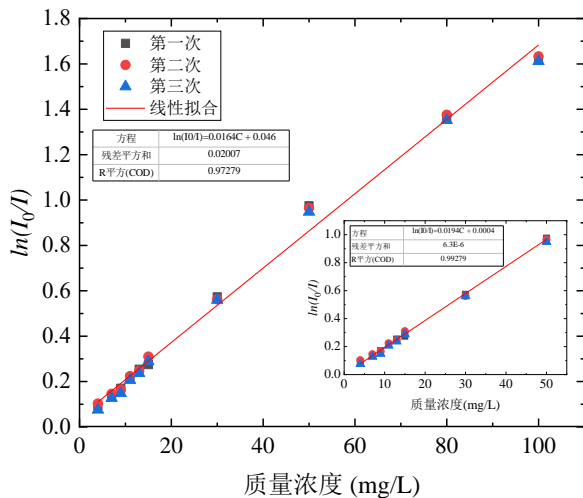


图5 消光法标定结果

Fig. 5 Extinction method calibration results

经最小二乘法线性拟合结果为

$$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right) = 0.0194C + 0.0004 \quad (5)$$

式中: I 为测量光强; I_0 为背景光强; C 为待求浓度。

2.3 光谱消光法污染物质量浓度测量系统验证

为了验证消光法浓度标定结果的准确性,根据污染物配比,制备浓度为8、18和75 mg/L三组没经过标定的污染物,本次实验共进行了三次重复性实验,经过与称重法对比分析验证,光谱消光法测量相对误差不大于±5%,具体测量结果如表2所示。

表2 消光法验证结果

Table 2 Extinction method verification results

实际浓度/ mg·L ⁻¹	测量结果/mg·L ⁻¹				相对误差/ %
	1	2	3	平均值	
8	7.62	7.82	8.11	7.85	-1.86
18	18.31	18.48	17.95	18.37	2.01
75	73.36	72.91	73.68	73.32	-2.24

2.4 应用

为了检验光谱消光法浓度在线测量效果,在将一体式测量段与抗污染试验台连接,如图6所示。由于实验室标定是以纯净水为流动工质,而现场实验是用航空煤油作为工质,前者折射率为1.33,后者折射率为1.43,折射率稍有差异,根据Lambert-Beer定律,折射率会影响光散射信号,因此需要对测量结果进行修正。由于测量对象的粒度分布、配比和种类已知,可以通过分别测量水和煤油作为介质时的光强,并将两者相除即可得到修正系数,如公式(6)所示。

$$\psi = \frac{E_o}{E_w} \quad (6)$$

式中: ψ 为修正系数; E_o 为煤油作为介质的光强; E_w 为水作为介质的光强。

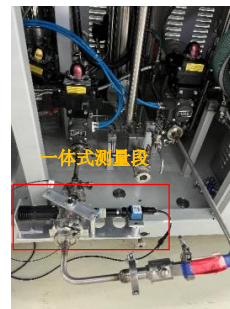


图6 燃油污染物浓度在线检测试验平台

Fig. 6 Fuel pollutant concentration online detection test platform

由于现场试验是先配制成一定浓度的污染物,然后再向燃油系统注入,通常使污染物不能充分混合,因此可以统计一段时间内的平均测量结果,以此减小测量误差。需要分析在线测量装置采样频率和统计平均数量对测量结果的影响,首先进行参数选取试验,不同工况测量参数如表3所示,结果如图7所示。其中②时间段内采样频率1 Hz,采样次数1次,可见测量结果变化剧烈;随着采样频率增大和采样次数增加,直至⑥时间段(采样频率50 Hz,测量结果为50次的平均值)时,其浓度值趋向稳定。其原因实在测量装置距离注污口近的情况下,其污染物以射流形式注射,易造成混合不均,因此在进行测量时需要在较短时间内连续采样,且进行多张平均,这样才能在反映其浓度变化细节的同时,减少混合不均带来的测量值波动。

表3 采样参数
Table 3 Sampling parameters

序号	采样频率/Hz	单周期取样点数	采样周期/s
①	1	100	100
②	1	1	1
③	2	2	1
④	10	10	1
⑤	20	20	1
⑥	50	50	1

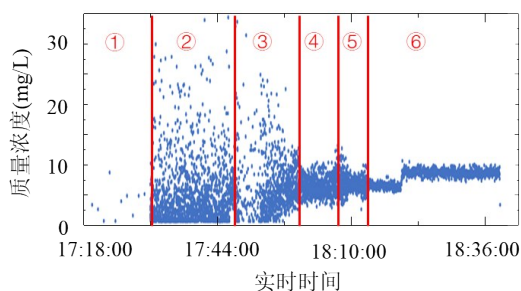


图7 采样频率和统计平均数量对测量结果的影响
Fig. 7 Effect of sampling frequency and statistical average number on measurement results

根据上文测量过程及采样频率参数选取,本次试验采用的采样频率为50 Hz,单周期取点数为50,共进行两个流量工况,分别为570 L/h和270 L/h。在线测量结果如图8所示,在试验刚开始阶段,浓度逐渐升高,随着主机转速稳定,其浓度也慢慢趋向稳定,当工况发生变化时,也可以看到浓度实时变化,并且在试验系统稳定时,测量结果也趋于稳定。为了评估光谱消光法浓度测量准

确性,每隔一段时间进行取样供滤膜称重法进行测量,图8中绿色标识的圈即为称重法取样时的实时浓度测量结果,可以观察到取样时明显浓度下降,造成这种现象主要原因是试验系统是定压系统,当取样口打开时,系统中压力降低,主流量会增大,而注污流量不变。由此可以看出该方法有较好的灵敏度,能很好地获取浓度变化细节。

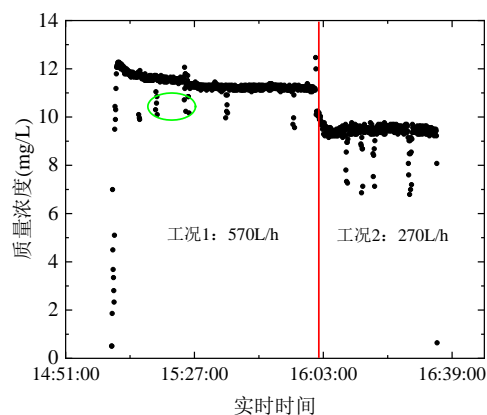


图8 光谱消光法燃油污染物在线测量结果
Fig. 8 Online measurement results of fuel pollutants by spectral extinction method

从图8可以看出:通过称重法采样的时间点,取该时间点前后的两分钟内的平均结果与滤膜称重法进行对比,可以发现其结果误差在10%以内,并且消光法浓度测量更稳定,具体如表3所示。

表4 结果对比及误差分析
Table 4 Results comparison and error analysis

称重法 取样点	称重法 /mg·L ⁻¹	光谱消光法	
		测量结果 /mg·L ⁻¹	相对误差 /%
1	10.75	11.55	7.42
2	12.42	11.70	-5.78
3	11.78	11.53	-2.13
4	10.84	11.32	4.47
5	10.36	11.15	7.63
6	8.81	9.26	5.16
7	10.24	9.85	-3.82
8	9.11	9.33	2.45
9	9.04	9.23	2.14

3 结 论

1) 针对抗污染实验污染物种类繁多、粒径范围大等难点,本文提出采用在线非取样式消光法测量。即当测量对象的颗粒种类、颗粒粒度分布、

颗粒种类混合比例已知情况下,基于 Lambert-Beer 定律,消光值 $\ln(I_0/I)$ 与颗粒质量浓度成正比相关。

2) 研制了一体式污染物浓度在线测量装置,搭建了光谱消光法污染物在线测量系统。并在实验室进行验证,结果表明光谱消光法测量误差不大于 $\pm 5\%$ 。最后在工业应用现场进行在线测量,与取样滤膜称重法测量结果进行对比,光谱消光法测量误差均在 10% 以内。

参考文献

- [1] 赵凤飞,刘慧娟,王桂华. 航空发动机燃油系统污染试验方案研究[J]. 航空维修与工程, 2013(4): 90-91.
Zhao Fengfei, Liu Huijuan, Wang Guihua. Research on fuel system contamination test of aero-engine[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2013(4): 90-91. (in Chinese)
- [2] 孙晓军,吴新,栾东. 航空发动机燃油系统抗污染综述[J]. 航空发动机, 2010, 36(6): 1-5, 50.
Sun Xiaojun, Wu Xin, Luan Dong. Review of antifouling technologies for aeroengine fuel system [J]. Aeroengine, 2010, 36(6): 1-5, 50. (in Chinese)
- [3] 郑山红,武海军,李想有志,等. 航空滑油磨粒在线监测技术研究进展[J]. 航空工程进展, 2025, 16(1): 9-17.
Zheng Shan hong, Wu Haijun, Li Xiangyouzhi, et al. Research progress on online monitoring technology of wear particles in aviation lubricating oil[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2025, 16(1): 9-17. (in Chinese)
- [4] 裴晓芳. 油液污染度分析在油液监测技术中的应用[J]. 设备管理与维修, 2019(23): 145-146.
Pei Xiaofang. Application of oil contamination analysis in oil monitoring technology [J]. Plant Maintenance Engineering, 2019(23): 145-146. (in Chinese)
- [5] 张波,李若愚,赵国旗. 喷气燃料中污染物分析方法现状及有关建议[J]. 石油商技, 2018, 36(3): 68-71.
Zhang Bo, Li Ruoyu, Zhao Guoqi. Present situation of analytical methods for pollutants in jet fuel and relevant suggestions [J]. Petroleum Products Application Research, 2018, 36(3): 68-71. (in Chinese)
- [6] 中国人民解放军总装备部. 航空工作液固体污染度分级: GJB 420B—2015[S]. 北京: 国防工业出版社, 2019.
General Armaments Department of the People's Liberation Army of China. Classification of solid contamination degree of aviation working fluids: GJB 420B—2015 [S]. Beijing: National Defense Industry Press, 2019. (in Chinese)
- [7] ASTM. Standard test method for particulate contaminant in aviation fuel by line sampling: ASTM D2276-22[S]. US: ASTM, 2022.
- [8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 液压传动、液体污染采用称重法测定颗粒污染度: GB/T 27613—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Hydraulic
- fluid power—fluid contamination determination of particulate contamination by the gravimetric method: GB/T 27613—2011 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2011. (in Chinese)
- [9] 任晓明,刘飞飞,张慧,等. 颗粒计数器测定过程中的影响因素[J]. 煤炭与化工, 2025, 48(6): 157-160.
Ren Xiaoming, Liu Feifei, Zhang Hui, et al. Influencing factors in the process of particle counter measurement [J]. Coal and Chemical Industry, 2025, 48(6): 157-160. (in Chinese)
- [10] 陈柄昊,胡建强,郭力,等. 自动颗粒计数法测定喷气燃料污染度仪器对比研究[J]. 当代化工研究, 2018(12): 122-124.
Chen Binghao, Hu Jianqiang, Guo Li, et al. Comparative research of automatic particle counting method for measuring pollution of jet fuel [J]. Modern Chemical Research, 2018(12): 122-124. (in Chinese)
- [11] 孙冉,林显军,许士锦,等. 基于显微成像与图像识别的在线油液颗粒传感研究[J]. 润滑与密封, 2025, 50(7): 190-198.
Sun Ran, Lin Xianjun, Xu Shijin, et al. Research on online oil contamination particle sensing based on microscopic imaging and image recognition [J]. Lubrication Engineering, 2025, 50(7): 190-198. (in Chinese)
- [12] 卢利锋,刘龙龙,熊丽玲,等. 基于图像法的油液污染物光学识别与测量方法研究[J]. 液压气动与密封, 2025, 45(5): 9-16.
Lu Lifeng, Liu Longlong, Xiong Liling, et al. Research on optical identification and measurement of oil contaminants based on image method [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2025, 45(5): 9-16. (in Chinese)
- [13] Sun J Y, Wang L M, Li J F, et al. Online oil debris monitoring of rotating machinery: A detailed review of more than three decades [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 149: 107341.
- [14] 巩琛,张嘉祺,苗世海,等. 铁谱仪、铁量仪在油液监测中的应用及前景[J]. 山东化工, 2025, 54(11): 101-103.
Gong Chen, Zhang Jiaqi, Miao Shihai, et al. The application and prospect of ferrograph and ferrous quantity meter in oil monitoring [J]. Shandong Chemical Industry, 2025, 54(11): 101-103. (in Chinese)
- [15] Xie F, Wei H J. Research on controllable deep learning of multi-channel image coding technology in Ferrographic Image fault classification [J]. Tribology International, 2022, 173: 107656.
- [16] 蔡小舒,苏明旭,沈建琪,等. 颗粒粒度测量技术及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
Cai Xiaoshu, Su Mingxu, Shen Jianqi, et al. Particle size measurement technology and applications [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [17] Zhou W, Mei C, Qin J W, et al. A side-scattering imaging method for the in-line monitoring of particulate matter emissions from cooking fumes [J]. Measurement Science and Technology, 2021, 32(3): 034006.

(编辑:马文静)