

直接反射在线可视铁谱暗场显微成像特性分析

李博¹, 袁勋¹, 尹智¹, 吴伟¹, 邵军¹, 马富银²

(1. 西安石油大学机械工程学院, 710065, 西安; 2. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为评估直接反射在线可视铁谱(OLVF)暗场显微成像特性,提出了一种磨粒暗场显微成像模型。基于朗伯余弦和光后向散射理论建立了直接反射 OLVF 显微成像系统的反射光辐照度叠加模型,以实现磨粒暗场显微成像质量的定量评价;仿真计算互补金属氧化物半导体(CMOS)像面的反差透视比,分析了光学倍率、油液衰减系数和后向散射角变化对磨粒暗场显微成像清晰度的影响规律,确定了磨粒暗场显微成像的最优光学倍率为 2.2 和油液衰减系数大于 2.0;明确 CMOS 像面的反差透视比在 0.210~0.846 范围内变化,直接反射 OLVF 可通过暗场显微成像获得较高清晰度的磨粒图像,其磨粒探测精度约为 10 μm 。磨粒图像采集实验测试结果表明:直接反射 OLVF 暗场显微成像不仅能够从油液衰减系数大于 2.28 的原油、柴油机油中可靠捕获磨粒视觉信息,而且可从油液衰减系数小于 2.0 的液压油、齿轮油中获取磨粒谱片图像,解决了不同油液中金属磨粒探测问题,为在线监测采油装备磨损提供了可能性。

关键词: 直接反射在线可视铁谱;暗场显微成像;反差透视比;原油;磨粒

中图分类号: TH117.1;TH742 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202502019 **文章编号:** 0253-987X(2025)02-0189-12

Dark-Field Microscopy Imaging Characteristics of Wear Debris for Direct-Reflection Online Visual Ferrograph

LI Bo¹, YUAN Xun¹, YIN Zhi¹, WU Wei¹, SHAO Jun¹, MA Fuyin²

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To analyze the dark-field microscopy imaging characteristics of wear debris for direct-reflection online visual ferrograph (OLVF), a new dark-field microscopy imaging model was proposed. By taking Lambert's cosine law and light backscattering theory as references, a reflection light irradiance superposition model was presented for direct-reflection OLVF microscopy system to quantitatively evaluate the dark-field microscopy imaging sharpness of wear debris. On the basis of Matlab simulation and calculation of contrast transmittance on CMOS image plane, how the changes in optical magnification, oil attenuation coefficient, and backscattering angle affect the contrast transmittance of dark-field microscopy imaging sharpness of wear debris were investigated, by which the numerical optimum of optical magnification can be calculated and ascertained correctly to be 2.2 and the oil attenuation coefficient for direct-reflection OLVF debris detection was determined to be more than 2.0. It was definite that the

contrast transmittance on CMOS image plane fluctuated within the range of 0.210 to 0.846. Moreover, the high-resolution wear debris images can be obtained by using the dark-field microscopy imaging detection of direct-reflection OLVF, whose detecting accuracy was about 10 μm . Finally, an experimental test of debris image acquisition was carried out. The results show that not only the visual information of wear debris can be reliably obtained from the diesel engine oil and crude oil with more than 2.28 oil attenuation coefficient by using the dark-field microscopy imaging of direct-reflection OLVF, but also the reflected ferrograms of wear debris can be effectively captured from the hydraulic oil and gearbox oil with less than 2.0 oil attenuation coefficient. In this way, metal wear debris in different oils can be detected, and the wear of oil extraction equipment can be monitored online.

Keywords: direct-reflection online visual ferrograph; dark-field microscopy imaging; contrast transmittance; crude oil; wear debris

原油中携带的金属磨粒特征信息可反映抽油杆管点蚀及磨损状态^[1],其磨粒浓度、颜色、粒度分布及形态特征与抽油杆管磨损演变机理关系密切。在线可视铁谱(OLVF)作为一项重要的磨粒监测手段^[2],能够在线捕捉磨粒沉积谱图像,通过提取磨粒视觉特征参数表征磨损,分析机械传动部件异常磨损故障。显微成像是 OLVF 探头可靠获取磨粒视觉信息的关键技术,主要分为透射和反射两种模式^[3],透射成像采用光投影方式获取磨粒视觉信息,而反射成像则基于光的反射与散射原理获得磨粒彩色图像信息。文献[4]设计了一种基于透射光成像的短距离沉积 OLVF,可捕获磨粒透射光谱片,并从中提取磨粒浓度、粒度等视觉特征参数,但透射光谱片中无法呈现磨粒颜色、形貌特征,加之由于磁极遮挡减小了 OLVF 透射光成像的视场范围,进而影响磨粒特征参数计算精度和磨损在线监测之准确性。于是,文献[5]提出了基于反射光成像的全视场 OLVF,相对于透射光成像避免了磁极遮挡,增大了磨粒显微成像视场范围,反射光谱片中磨粒信息量更多,有助于提高磨损在线监测准确度,实验结果证明了反射光成像的磨粒浓度监测与透射光成像具有相同的有效性,且全视场 OLVF 适用于液压系统和齿轮传动系统的磨损在线监测^[6]。然而,短距离沉积 OLVF 探头透射光穿过不透光油液时,光能量吸收损耗导致磨粒探测失效^[7],全视场 OLVF 探头则无法从透光率小于 10% 的低透光油液中获取磨粒视觉信息^[7],所述 OLVF 不能透过低透光和不透光油层实现磨粒探测及其图像信息获取。

为解决上述问题,文献[8]设计了均匀照明的环形阵列反射光源,文献[9]建立了 OLVF 显微成像系统的像面照度模型,分析了 OLVF 像面照度均匀

性,提出了暗场照明条件下磨粒图像获取的 OLVF 显微成像系统^[10],并研发了基于暗场显微成像的直接反射 OLVF 磨粒探头原型^[11],解决了不透光油液中磨粒图像信息获取及浓度特征提取问题,使黑油状态下 OLVF 磨损在线监测成为可能。然而,暗场显微成像的微小颗粒表面易发生反光、散射作用^[12],加之光线进入不同透光度油液中也会引起后向光散射,进入显微成像系统的散射光造成磨粒暗场显微成像清晰度发生变化,但由于缺乏有效的光学成像模型,导致直接反射 OLVF 暗场显微成像质量难以定量表征和评价。文献[13]提出基于物方差动并行共聚焦原理的轴向显微成像系统光强度模型,实现了轴向的高精度测量,文献[14]提出基于 regionprops 函数和光纤束并行彩色共聚焦的反射光显微成像模型,实现了微米级颗粒高精度、高效率的三维形貌重构,但上述模型无法用于流体介质条件下微粒显微成像测量和三维重构。因此,文献[15]提出基于波动光学理论的光场显微成像模型,采用反卷积运算重建了液体中微粒的三维形貌,文献[16]提出基于辐照度叠加的水下反射光显微成像模型,实现了水下浮游生物显微成像机理分析。此外,文献[17]提出基于朗伯余弦与小角度散射理论的全视场 OLVF 反射光显微成像模型,定量评价了透明油液中磨粒成像清晰度,但这些模型不能应用于低透光和不透光油液中微粒显微成像效果的定量分析与评价,关于 OLVF 暗场显微成像模型和评估方法目前尚无记载。

为此,本文提出构建直接反射 OLVF 磨粒暗场显微成像模型,仿真分析不同光学倍率、油液衰减系数与后向散射角条件下互补金属氧化物半导体(CMOS)像面反差透视比的变化规律,通过反射光与透射光磨粒图像采集实验,测试分析直接反射 OLVF

暗场显微成像性能,以实现磨粒暗场显微成像质量的定量评价。实验结果表明,运用直接反射 OLVF 暗场显微成像获取不同类型油液中磨粒视觉特征信息是有效且可行的,尤其适用于黑油中磨粒可视化监测。

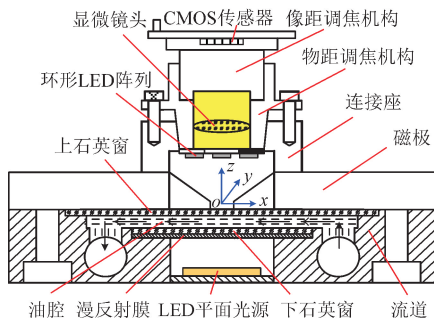
1 磨粒暗场显微成像模型

直接反射 OLVF 磨粒探头主要由显微成像系统和高梯度磁场装置组成,直接反射 OLVF 显微成像系统如图 1 所示。CMOS 传感器、显微镜镜头、环形 LED 阵列、像距与物距调焦机构通过连接座与流道相连,形成显微成像系统;高梯度磁场装置的磁极嵌入连接座底部的凹槽内,流道固定在磁极的下方。流道内自上而下安装有上石英窗、下石英窗、漫反射膜及 LED 平面光源,上石英窗与下石英窗分别位于流道内中心凹槽的上、下表面,密封固定之后形成油腔,漫反射膜作为显微成像背景,被粘着于下石英窗的下表面;LED 平面光源作为透射光源,被固定于油腔的正下方,用于检测油层透光度,对比磨粒暗场显微成像效果。在高梯度磁场力作用下,油液中的磨粒被吸附在上石英窗的石英-油液界面位置,环形 LED 阵列作为反射光源,其辐射光线透过流道内的上石英窗即可被磨粒表面接受,部分辐射光线在磨粒表面反射,其反射光通过上石英窗和显微镜镜头在 CMOS 像面产生磨粒图像;其余辐射光线则进入油腔被漫反射膜反射且被油层吸收、散射之后,经显微镜镜头而在 CMOS 像面形成背景。令磨粒表面辐射光线与法线方向的夹角为 θ_1 ,微元 dS 辐射光线的出射角为 θ_2 ,光线进入空气后折射角与主光轴之间的夹角为 ω_1 ,微元体 ΔA 至入瞳中心与主光轴的夹角为 ω_2 ,微元 dS 出射光线经折射至入瞳中心与主光轴的夹角为 ω_3 ,物方入瞳直径为 D_0 ,LED 反射光源与上石英窗-油层界面的间距为 H ,LED 反射光源的有效半径为 r ,LED 反射光源出射光线在上石英窗表面的反射角为 u ,油层厚度为 c_1 ,上石英窗厚度为 c_2 ,下石英窗厚度为 c_3 ,LED 反射光源的辐射光线入射角为 α ,光线进入上石英窗及油层的折射角为 γ ,入瞳面至磨粒表面的间距为 l_{r1} ,油液后向散射角为 θ_{bs} , n_g 、 n_a 分别为石英和空气的折射率。

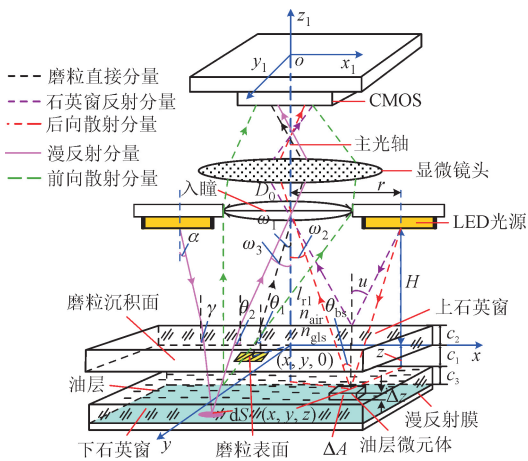
图 1(b)所示,油腔中的磨粒沉积在上石英窗与油层界面处,LED 反射光源的出射光线透过石英窗被磨粒表面反射,二次反射光成像于 CMOS 像面产生的辐照度称之为磨粒直接分量;辐射光线经上石英窗反射,二次反射光在 CMOS 像面产生的辐照度称之为石英窗反射分量;光线透过上石英窗进入油

腔,在油层中发生后向散射,部分散射光进入显微镜镜头在 CMOS 像面产生的辐照度称之为后向散射分量;光线经漫反射膜表面反射,其二次反射光未经油层散射而成像于 CMOS 像面产生的辐照度称之为漫反射分量,二次反射光在油层中发生小角度散射所产生的辐照度称之为前向散射分量。不考虑光路中机械部件反射的杂散光影响,LED 反射光源在 CMOS 像面产生的总辐照度 E_r 可表示为磨粒直接分量 $E_{r,d}$ 、石英窗反射分量 $E_{r,r}$ 、后向散射分量 $E_{r,bs}$ 、漫反射分量 $E_{r,b}$ 及前向散射分量 $E_{r,fs}$ 的线性叠加,暗场显微成像的磨粒图像可由 $E_{r,d}$ 、 $E_{r,b}$ 之差的绝对值来描述,即

$$E_r = |E_{r,d} - E_{r,b}| + E_{r,r} + E_{r,bs} + E_{r,fs} \quad (1)$$



(a) 显微成像系统结构示意图



(b) 磨粒暗场显微成像模型

图 1 直接反射 OLVF 显微成像系统

Fig. 1 Direct-reflection OLVF microscopic imaging system

假设反射光谱片中背景与磨粒图像之间的相对辐照度变化为 $|E_{r,d} - E_{r,b}|$,目标磨粒可看作是相对辐照度变化的结果。反差透视比是定量描述图像对比度高低的的有效指标^[18],其值越大表明反射光下磨粒与背景之间的图像对比度越高,则磨粒暗场显微成像越清晰。反差透视比可表示为实际对比度与固有对比度的比值^[19],则直接反射 OLVF 暗场显微成像的反差透视比 $C_r(x_1, y_1)$ 可表示为

$$C_r(x_1, y_1) = \frac{|E_{r,d}(x_1, y_1) - E_{r,b}(x_1, y_1)|}{|E_{r,d}(x_1, y_1) - E_{r,b}(x_1, y_1)| + E_{r,r}(x_1, y_1) + E_{r,bs}(x_1, y_1) + E_{r,fs}(x_1, y_1)} \quad (2)$$

1.1 磨粒直接分量

假设磨粒与上石英窗紧密贴合,且磨粒表面的反射率相同,磨粒表面看作朗伯余弦体,忽略

光线轴向偏移量造成的 CMOS 像面辐照度变化,则 CMOS 像面接受到的磨粒直接分量 $E_{r,d}(x_1, y_1)$ 表达式为

$$\begin{cases} E_{r,d}(x_1, y_1) = \frac{\tau_0 \rho_n (1 - R_T) D_0^2 \cos \theta_1 \cos^3 \omega_1}{4f^2 (\beta + 1)^2} E_{wd}(x_1, y_1) \\ E_{wd}(x_1, y_1) = (1 - R_T) I_0 H \beta^3 \sum_{n=1}^8 \left(\left(x_1 - \beta r \cos \frac{\pi n}{4} \right)^2 + \left(y_1 - \beta r \sin \frac{\pi n}{4} \right)^2 + \beta^2 H^2 \right)^{-3/2} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \cos \theta_1 = \frac{1}{n_g} \sqrt{n_g^2 - n_a^2 (1 - \cos^2 \omega_1)} \\ \cos \omega_1 = \frac{f(1 + \beta)}{\sqrt{f^2 (1 + \beta)^2 + x_1^2 + y_1^2}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $E_{wd}(x_1, y_1)$ 为 LED 反射光源在磨粒表面总的辐照度^[8], 其中 I_0 为主光轴方向的发光强度; τ_0 为显微镜头透光率; ρ_n 为金属磨粒反射比, 由菲涅尔公式可得铁金属表面的反射比为 s 波、p 波反射系数之和的平均值^[20], 结合文献[21] 计算波长 450 ~ 650 nm 范围内的反射比平均值, 可得 $\rho_n \approx 0.62$; $R_T = (n_g - n_a / n_g + n_a)^2$ 为石英窗反射率; f 为显微成像系统的有效焦距; β 为光学倍率。

1.2 石英窗反射分量

直接反射 OLVF 的反射光源是由 8 颗贴片 LED 组成的环形阵列, 假设单颗贴片 LED 的有效发光面积为 A_0 , LED 表面微元 dB 辐射光线经石英窗反射进入入瞳中心, LED 反射光源与上石英窗的间

距为 $H - c_2$, 则微元 dB 沿 u 方向至显微镜头在 CMOS 像面产生的辐照度 $E_{r,q}(x_1, y_1)$ 可表示为

$$\begin{cases} E_{r,q}(x_1, y_1) = \frac{\varphi_{r,q}(x_1/m_d, y_1/m_d)}{m_d^2 \text{dB}} = \frac{\pi D_0^2 \tau_0 I_u(x_1/m_d, y_1/m_d)}{4m_d^2 (l_{r1} + H - 2c_2)^2} \\ I_u(x_1, y_1) = \frac{R_T I_0 \cos u(x_1/m_d, y_1/m_d) \text{dB}}{A_0} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} m_d = \frac{f(\beta + 1)}{l_{r1} + H - 2c_2} \\ l_{r1} = f \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $I_u(x_1, y_1)$ 为 u 方向微元 dB 的发光强度; m_d 为微元 dB 在 CMOS 像面的放大倍率。采用像面坐标表示物面坐标, CMOS 像面接受到的石英窗反射分量 $E_{r,r}(x_1, y_1)$ 为 8 颗贴片 LED 辐射光线经上石英窗反射, 进入显微镜头在 CMOS 像面产生的辐照度的线性叠加, 则有

$$\begin{cases} E_{r,r}(x_1, y_1) = \frac{\pi D_0^2 \tau_0 R_T I_0 \sum_{n=1}^8 \cos^4 u_n(x_1, y_1)}{4A_0 f^2 (\beta + 1)^2} \\ \cos u_n(x_1, y_1) = \frac{l_{r1} + H - 2c_2}{\sqrt{(x_1/m_d - r \cos(\pi n/4))^2 + (y_1/m_d - r \sin(\pi n/4))^2 + (l_{r1} + H - 2c_2)^2}} \end{cases} \quad (7)$$

1.3 后向散射分量

油层位于沉积磨粒的下方, 参考水下成像后向散射模型^[18], 将油层划分成等厚度的矩形微元体。已知油层厚度为 c_1 , 令微元体的表面积为 ΔA , 厚度为 Δz , 那么可将油层划分为 $c_1/\Delta z$ 个等厚度的微元体 (Δz 尽可能小, 以提高精度, 且保证 $c_1/\Delta z$ 为整数), 所有微元体与 CMOS 传感器的像面平行。考虑到 LED

反射光源辐射光线经石英窗反射和油层吸收的光能量损耗, 已知 ΔA 至入瞳中心与主光轴的夹角为 ω_2 , 采用 Δz 表征 z 轴方向位置坐标, 则坐标原点至每个微元体的中心间距为 $z = \Delta z(0.5 - i)$, 其中 $i = 1, \dots, c_1/\Delta z$ 。令微元体 ΔV 的表面积 ΔA 在 CMOS 像面投影面积的放大倍率为 B_m , 则 CMOS 像面接受到的辐照度后向散射分量 $E_{r,bs}(x_1, y_1)$ 可表示为

$$\begin{cases} E_{r,bs}(x_1, y_1) = \sum_{i=1}^{c_1/\Delta z} \frac{\pi D_0^2 (1 - R_T) \tau_0 \delta_{rb}(\theta_{bs}) \cos^3 \omega_2 E_{rb}(x_1, y_1) \Delta z}{4f^2 (\beta + 1)^2 e^{-C_0 |\Delta z(0.5-i)|}} \\ E_{rb}(x_1, y_1) = (1 - R_T) (H - \Delta z(0.5 - i)) I_0 e^{-C_0 |\Delta z(0.5-i)|} \sum_{n=1}^8 ((x_1/B_m - r \cos \pi n/4)^2 + (y_1/B_m - r \sin \pi n/4)^2 + (H - \Delta z(0.5 - i))^2)^{-3/2} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \cos \omega_2 = \frac{l_{r1} - \Delta z(0.5 - i)}{\sqrt{(l_{r1} - \Delta z(0.5 - i))^2 + (x_1/B_m)^2 + (y_1/B_m)^2}} \\ B_m = \frac{f(\beta + 1)}{l_{r1} - \Delta z(0.5 - i)} \end{cases} \quad (9)$$

式中: C_0 为油液衰减系数; $\delta_{rb}(\theta_{bs})$ 为体散射函数; $E_{rb}(x_1, y_1)$ 为微元 ΔA 接受到的 LED 反射光源辐照度。

假设油液中的后向散射光主要由油液分子所产生, 令主波长 $\lambda = 500 \text{ nm}$ 反射光线在油液中的光散射系数为 b_{oil} , 由蒙特卡洛仿真分析可得油液的体散射函数 $\delta_{rb}(\theta_{bs})$ [22]

$$\delta_{rb}(\theta_{bs}) = \frac{3b_{oil}(1 + p\cos^2\theta_{bs})}{4\pi(3 + p)} \quad (10)$$

式中: $p = 0.84$ [23] 为极化因数。

$$\begin{cases} \varphi_{r,b}(x_1, y_1) = \frac{D_0^2 W_1^2 n_g^2 (1 - R_T)^2 e^{-2C_0 c_1 / \cos \gamma} \rho_b E_0(x_1, y_1) \cos \theta_2 \cos^3 \omega_3}{4n_a^2 (W_1 - 2(c_1 + c_2 + c_3)(\tan \alpha - \tan \gamma))^2 (l_{r1} + c_1 + c_3)^2} dS \\ W_1 = 2((H + c_1 + c_3)\tan \alpha + \sqrt{1/\pi} - r) \end{cases} \quad (11)$$

式中: $E_0(x_1, y_1)$ 为漫反射膜表面接受到的 LED 反射光源辐照度分布 [9]; 石英窗与油液折射率相近, 忽略差异, 则有 γ 恒等于 $\arcsin(n_a \sin \alpha / n_g)$ 。微元 dS 通

1.4 漫反射分量及其前向散射分量

假设漫反射膜与下石英窗紧密贴合, 将漫反射膜表面等分为若干个微元, 且每一个微元被看作辐照度均匀的朗伯余弦体。当油腔通油后, 任一朗伯余弦体微元 dS 的辐射光线将穿过下石英窗、油层和上石英窗进入显微镜头的入射光瞳。假设显微成像系统的入射光瞳与物方主平面重合, 用像面坐标及光学倍率表征漫反射膜表面微元坐标, 令漫反射膜表面的光学反射系数为 ρ_b , 已知微元 dS 光线至入瞳中心与主光轴的夹角为 ω_3 , 那么沿 ω_3 方向入瞳接受到微元 dS 的辐通量 $\phi_{r,b}(x_1, y_1)$ 为

过显微镜头在 CMOS 像面形成微元图像, 则 CMOS 像面 (x_1, y_1) 坐标点的漫反射分量 $E_{r,b}(x_1, y_1)$ 辐照度为

$$\begin{cases} E_{r,b}(x_1, y_1) = \frac{\tau_0 D_0^2 W_1^2 n_g^2 (1 - R_T)^2 \rho_b E_0(x_1, y_1) \sqrt{n_g^2 - n_a^2 (1 - \cos^2 \omega_3)} \cos^3 \omega_3}{8n_a^2 ((H - c_2)\tan \alpha + (c_1 + c_2 + c_3)\tan \gamma + \sqrt{1/\pi} - r)^2 f^2 (\beta + 1)^2} e^{-\frac{2C_0 c_1}{\cos \gamma}} \\ E_0(x_1, y_1) = \frac{\sqrt{6} r I_0 (1 - R_T)^2}{2} \sum_{n=1}^8 \left(\left(\frac{x_1}{Q} - r \cos \frac{\pi n}{4} \right)^2 + \left(\frac{y_1}{Q} - r \sin \frac{\pi n}{4} \right)^2 + \frac{3r^2}{2} \right)^{-3/2} \end{cases} \quad (12)$$

式中: Q 为漫反射膜表面微元在 CMOS 像面的光学倍率。忽略石英窗和油层引起的光路轴向偏移, 由牛顿公式可得式(12)中 $\cos \omega_3$ 、 Q 表达式

$$\begin{cases} \cos \omega_3 = \frac{l_{r1} + c_1 + c_3}{\sqrt{(l_{r1} + c_1 + c_3)^2 + (x_1/Q)^2 + (y_1/Q)^2}} \\ Q = \frac{f(\beta + 1)}{l_{r1} + c_1 + c_3} \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} E_{r,fs}(x_1, y_1) = E_{r,b}(x_1, y_1) \otimes F_{fs}(x_1, y_1 | b_{oil}, C_0, Q, c_1) \\ F_{fs} \approx (e^{-\frac{500b_0 + C_0}{2} \sqrt{\frac{x_1^2 + y_1^2}{Q^2 + Q^2 + c_1^2}}} - e^{-C_0 \sqrt{\frac{x_1^2 + y_1^2}{Q^2 + Q^2 + c_1^2}}}) \mathcal{F}^{-1} e^{-C_0 c_1 w} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\mathcal{F}^{-1}$ 为傅里叶反变换; w 为空间频率。

2 仿真结果与分析

Matlab 仿真计算直接反射 OLVF 显微成像系统 CMOS 像面的反差透视比, 分析光学倍率 β 、油液衰减系数 C_0 与后向散射角 θ_{bs} 对反差透视比的影响, 进而分析直接反射 OLVF 磨粒暗场显微成像清晰度的变化规律。运用 OV7710 CMOS 传感器作为显微成像系统的接受器件, 其像面尺寸约为

微元 dS 的辐射光线在入瞳方向油层中发生前向散射, 由小角度散射理论可知, 前向散射分量近似等于漫反射分量 $E_{r,b}(x_1, y_1)$ 与油液中光散射点扩展函数 $F_{fs}(x_1, y_1 | b_{oil}, C_0, Q, c_1)$ 之卷积 [24], 则 CMOS 像面接受到的前向散射分量 $E_{r,fs}(x_1, y_1)$ 辐照度 [25-26] 为

4.0 mm × 3.0 mm, 确定 CMOS 像面的有效视场区间为 $x_1 \in [-2, 2]$ 、 $y_1 \in [-1.5, 1.5]$ 。式(3) ~ (14) 中仿真计算参数如表 1 所示, 其中折射率 $n_a \approx 1.0$ 、 $n_g \approx 1.5$ 。假设光线穿过透明基础油的能量损耗由光散射作用引起, 则油液衰减系数与光散射系数近似相等, 所以采用 UV3600 紫外可见分光光度计测得主波长 $\lambda = 500 \text{ nm}$ 光在油液中的光散射系数 $b_{oil} \approx 0.095$ 。

表 1 仿真计算参数^[7,9,23]

Table 1 Simulation parameters for calculating contrast transmittance^[7,9,23]

参数	数值	参数	数值
r/mm	6.5	I_0/cd	1.98
H/mm	8.0	$\Delta z/\text{mm}$	0.01
c_1/mm	1.0	τ_0	0.95
c_2/mm	0.8	f/mm	8.0
c_3/mm	1.0	R_T	0.04
D_0/mm	5.0	$\alpha/(\circ)$	45
A_0/mm^2	9.18	ρ_b	0.9

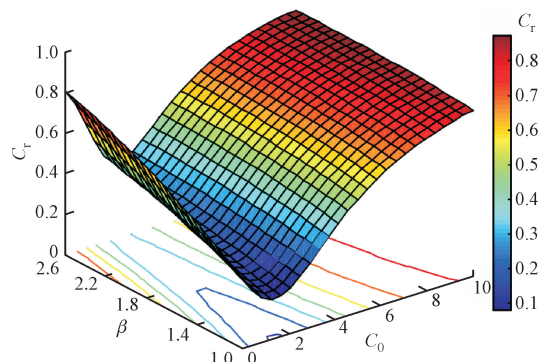
对焦状态下 CMOS 像面几何中心与主光轴的交点作为轴上像点。采用有效半径 $r=6.5\text{ mm}$ 的环形 LED 阵列产生近似均匀照明,假设后向散射分量 $E_{r,bs}$ 辐照度全部被 CMOS 像面接受,此时油液后向散射角 $\theta_{bs}=0$ 。当 β 取值分别为 1.0、1.4、1.8、2.2、2.6 时,在 $C_0\in[0,10]$ 条件下仿真计算 CMOS 像面轴上像点的反差透视比 $C_r(0,0)$ 变化,结果如图 2 所示。图 2(b)可知,随着油液衰减系数 C_0 增大,轴上像点 $C_r(0,0)$ 先减小然后逐渐增大。当 $C_0<2$ 时油液透光,漫反射分量 $E_{r,b}$ 辐照度大于磨粒直接分量 $E_{r,d}$,由于无油层遮挡 $E_{r,d}$ 保持不变,结合式(2)可知,随着 C_0 变大油腔内油液吸光、散射损耗指数增大, $|E_{r,d}-E_{r,b}|$ 相对辐照度减小,导致 $C_r(0,0)$ 值随之减小,此时 CMOS 像面磨粒与背景之间的图像对比度降低,直接反射 OLVF 可获得明场显微成像的磨粒反射光谱片;在 $C_0=2$ 附近时,轴上像点 $C_r(0,0)$ 达到最小值,此时磨粒与背景之间图像对比度最低,说明直接反射 OLVF 显微成像变模糊;当 $C_0>2$ 时,随着 C_0 持续增大油液吸光损耗极大,由于 $E_{r,b}<E_{r,d}$ 且 $E_{r,b}$ 逐渐趋近于 0,由式(2)可得, $C_r(0,0)$ 随之再次变大,此时 CMOS 像面磨粒与背景之间的图像对比度逐渐提高,直接反射 OLVF 可获得暗场显微成像的磨粒反射光谱片。此外,光学倍率 β 越大,轴上像点 $C_r(0,0)$ 持续增大,则 CMOS 像面磨粒与背景图像对比度越高。

直接反射 OLVF 的磨粒探测精度即为其显微成像系统的光学分辨率,为获得最佳磨粒暗场显微成像质量,显微镜头衍射极限分辨率须大于或等于 CMOS 传感器分辨率。考虑到光主波长和光学倍率,由瑞利判断计算求得艾里斑半径,结合道威判断可确定显微镜头衍射极限分辨率,那么该显微成像系统的光学分辨率可表示为 CMOS 传感器分辨率

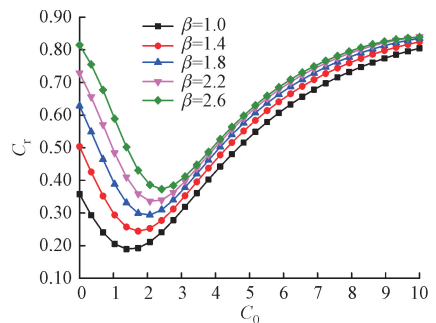
与显微镜头衍射极限分辨率之和,则有^[11]

$$\begin{cases} S_r = 0.61\beta\lambda/n_{\text{air}}\sin(\arctan(D_0/2f)) \\ \delta_T \geq (2a + 0.85S_r)/\beta \end{cases} \quad (15)$$

式中: δ_T 为直接反射 OLVF 显微成像系统的光学分辨率; S_r 为艾里斑半径; $a=6\text{ }\mu\text{m}$ 为 CMOS 传感器像元尺寸。相关研究结果表明,机械磨损产生的磨粒粒径分布在 $10\sim100\text{ }\mu\text{m}$ 范围内^[21],因而将直接反射 OLVF 显微成像系统的光学分辨率设计为 $10\text{ }\mu\text{m}$,结合表 1 参数值,利用式(15)计算其光学倍率应满足 $\beta\geq 1.6$ 。然而,光学倍率增大有助于提高直接反射 OLVF 的磨粒探测精度,所以本文选定 $\beta=2.2$,此时艾里斑半径约为 $2.25\text{ }\mu\text{m}$,代入式(15),求得显微成像系统的光学分辨率理论值约为 $6.5\text{ }\mu\text{m}$,表明 $10\text{ }\mu\text{m}$ 磨粒成像于 CMOS 像面可准确分辨。随着光学倍率变大,艾里斑半径和成像系统的光学分辨率随之增大,而衍射极限分辨率由显微镜头物方入瞳直径和焦距决定,说明增大光学倍率且减小艾里斑有助于提高磨粒暗场显微成像分辨率。



(a) C_r 与 β 、 C_0 的对应关系

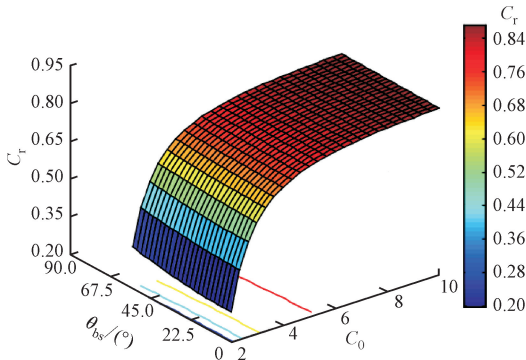


(b) 不同光学倍率下 C_r 与 C_0 的对应关系

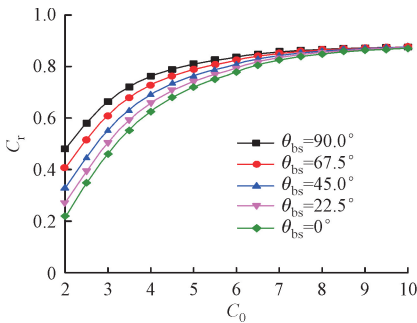
图 2 β 与 C_0 对 CMOS 像面轴上像点反差透视比的影响
Fig. 2 Effect of two arguments of β and C_0 on contrast transmittance at on-axis image point of CMOS image plane

当光学倍率 β 为 2.2 时,在 $\theta_{bs}\in[0^\circ,90^\circ]$ 和 C_0

$\in [2,10]$ 区间内仿真计算直接反射 OLVF 暗场显微成像轴上像点的反差透视比 C_r 变化,结果如图 3 所示。由图 3(b) 可知,当后向散射角 θ_{bs} 取值分别为 $0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ, 90^\circ$ 时,随着 C_0 的增大,油层对光能量的吸收损耗随之变大,致使 CMOS 像面接受到后向散射分量 $E_{r,bs}$ 、前向散射分量 $E_{r,fs}$ 的辐照度减小,然而磨粒直接分量 $E_{r,d}$ 辐照度为恒定值,由式 (2) 可得,暗场显微成像轴上像点 C_r 值逐渐增大,从而提高了 CMOS 像面磨粒与背景之间的图像对比度。此外,当 $2.0 < C_0 \leq 5.0$ 时, θ_{bs} 越大进入显微镜镜头被 CMOS 像面接受到的后向散射分量 $E_{r,bs}$ 越小, θ_{bs} 由 0° 增至 90° , 则轴上像点 $C_r(0,0)$ 的最小值由 0.210 增大至 0.480,表明直接反射 OLVF 暗场显微成像的磨粒图像对比度逐渐升高;当 $C_0 > 5.0$ 且 θ_{bs} 由 0° 增至 90° 时, C_0 增大,轴上像点 $C_r(0,0)$ 均趋近于恒定值 0.846,此时后向散射角变化对反差透视比的影响极小,进一步说明油层中光能量衰减越大,直接反射 OLVF 磨粒暗场显微成像越清晰。因此,可以确定油液衰减系数和后向散射角是决定直接反射 OLVF 磨粒暗场显微成像清晰度的关键。



(a) C_r 与 C_0 、 θ_{bs} 的对应关系

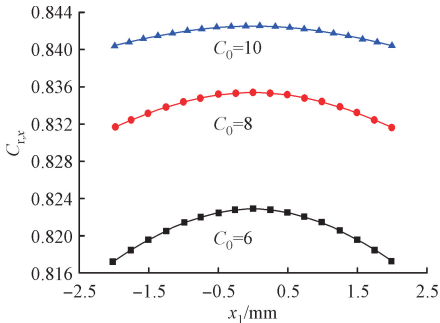


(b) 不同后向散射角下 C_r 与 C_0 的对应关系

图 3 C_0 与 θ_{bs} 对 CMOS 像面轴上像点反差透视比的影响
Fig. 3 Effect of two arguments of C_0 and θ_{bs} on contrast transmittance at on-axis image point of CMOS image plane

轴上像点 C_r 变化无法反映远离直接反射 OLVF 显微成像系统主光轴附近的磨粒暗场显微成像质量,有必要分析 CMOS 像面边缘视场区域的反差透视比 $C_{r,x}(x_1, 0)$ 变化情况。因此,设定 C_0 取值分别为 6、8、10 且 $\theta_{bs} = 45^\circ$, 在 $x_1 \in [-2, 2]$ 区间内仿真计算 CMOS 像面 $C_{r,x}(x_1, 0)$ 的变化规律,结果如图 4 所示。由图 4(a) 可见,当 C_0 由 6 增至 10 时,反差透视比值在 0.816 ~ 0.844 范围内变化,其变化量仅为 0.028,说明当 $C_0 > 5.0$ 时油液衰减系数变化对直接反射 OLVF 磨粒暗场显微成像清晰度的影响逐渐减小。CMOS 像面轴上像点的反差透视比 $C_r(0,0)$ 大于边缘视场区域反差透视比 $C_{r,x}(x_1, 0)$, 随着油液衰减系数 C_0 增大,CMOS 像面边缘视场区域的 $C_{r,x}(x_1, 0)$ 持续变大,但沿 x 轴方向 $C_{r,x}(x_1, 0)$ 与轴上像点 C_r 的偏差逐渐减小。这是因为,暗场显微成像状态下散射光能量主要集中于 CMOS 像面边缘视场区域,由式 (8) ~ (14) 可得, C_0 越大后向散射分量 $E_{r,bs}$ 、前向散射分量 $E_{r,fs}$ 越小,结合式 (2) 求得边缘视场区域的反差透视比 $C_{r,x}(x_1, 0)$ 值也越大,加之成像系统中显微镜镜头存在场曲像差,将导致轴上像点附近的反差透视比大于边缘视场区域,表明 CMOS 像面中心视场的磨粒暗场显微成像清晰度优于边缘视场。

当 $\theta_{bs} = 45^\circ$ 且 $C_0 = 10$ 时, $x_1 \in [-2, 2]$ 和 $y_1 \in [-1.5, 1.5]$ 区间内仿真计算获得 CMOS 像面反差透视比 $C_{r,xy}(x_1, y_1)$ 的等值线分布,结果如图 4(b) 所示,可知暗场显微成像的反差透视比 $C_{r,xy}(x_1, y_1)$ 在 0.8404 ~ 0.8418 范围内变化,CMOS 像面的图像对比度分布较为均匀。所以,随着油液衰减系数的增大,磨粒图像坐标位置与轴上像点之间的间距越小,直接反射 OLVF 磨粒暗场显微成像清晰度越高,且 CMOS 像面的图像对比度越均匀。此外,在 $\beta = 2.2$ 条件下采用直接反射 OLVF 显微成像系统获取 1300 目铁粉颗粒图像,测试结果如图 5 所示,可知该显微成像系统可识别粒径约为 $10 \mu\text{m}$ 的铁颗粒,能够满足不同油液中磨粒探测精度要求。



(a) x 轴方向 $C_{r,x}$ 的变化规律

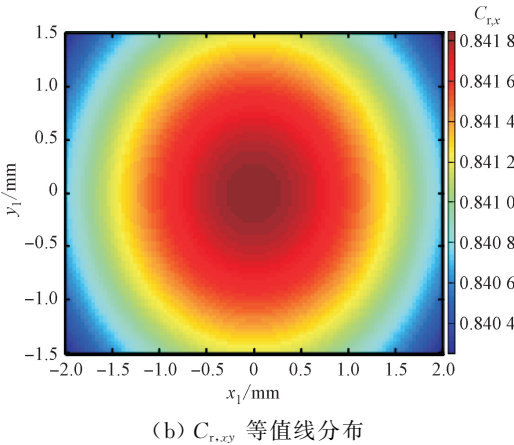


图 4 CMOS 像面的反差透视比

Fig. 4 Contrast transmittance on CMOS image plane

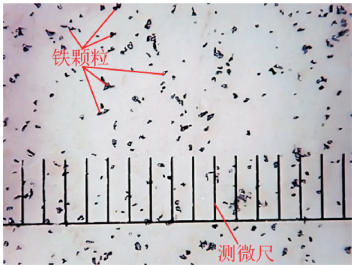


图 5 1300 目铁颗粒显微图像

Fig. 5 Microscopic image of iron particles with 1300 mesh

综上所述,在 $\beta \in [1.0, 2.6]$ 与 $C_0 \in [0, 10]$ 条件下仿真分析了 CMOS 像面轴上像点的反差透视比变化,确定直接反射 OLVF 光学倍率 $\beta = 2.2$ 。当 $2.0 < C_0 \leq 5.0$ 时,后向散射角越大 CMOS 像面轴上像点的反差透视比越大; $C_0 > 5.0$ 时后向散射角对反差透视比变化基本无影响,油液衰减系数大小决定直接反射 OLVF 磨粒暗场显微成像清晰度。在 CMOS 像面中心与主光轴重合条件下,通过增大油液衰减系数,控制磁场使磨粒沉积于显微成像系统物方视场的主光轴附近,以保证 CMOS 像面获得磨粒最佳显微成像质量。测试结果表明,直接反射 OLVF 显微成像系统可满足粒径 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的磨粒探测精度要求。

3 实验测试与结果分析

采用球盘磨损机、搅拌器、蠕动泵-1、油杯及直接反射 OLVF 监测仪组成磨粒探测实验系统,如图 6 所示。其中,OLVF 监测仪是直接反射 OLVF 磨粒探头、MCU 微控制器、计算机和蠕动泵-2 的集成体。实验过程中,搅拌器将清洁油液持续搅拌,蠕动

泵-1 以特定流量将清洁油液滴入球盘磨损机的接触面,球盘摩擦副滑动磨损产生磨粒。计算机通过 RS485 串口将采样参数控制指令发送至 MCU 微控制器,控制蠕动泵-2 按照设定流量将球盘磨损机油槽中混有磨粒的油液注入直接反射 OLVF 磨粒探头的油腔,在高梯度磁场力作用下油液中磨粒被吸附,形成磨粒沉积谱,2.2 光学倍率下显微成像系统通过 CMOS 传感器捕获磨粒反射光谱片,并将图像信号上传于计算机进行分析处理,沉积磨粒被释放且随油液排入废油杯。

运用实验设备开展基于油液磨粒在线监测的磨粒图像采集实验,获取同一磨粒沉积谱的反射光与透射光谱片,测试分析油液衰减系数变化对直接反射 OLVF 暗场显微成像性能的影响规律。为确保磨粒有序沉积,减少沉积谱中磨粒磁化叠加,磨粒探测实验的采样参数设置如表 2 所示。

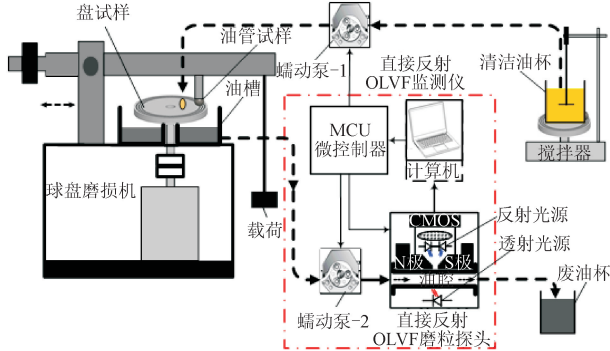


图 6 直接反射 OLVF 磨粒探测实验系统原理图

Fig. 6 Schematic diagram of Experimental system of wear debris detection based on direct-reflection OLVF

表 2 直接反射 OLVF 采样参数

Table 2 The sampling parameters of direct-reflection OLVF

参数	数值
采样周期/min	3.0
沉积时间/min	0.5
磁动势/(A · T)	800
冲刷流量/(mL · min) ⁻¹	6.0
沉积流量/(mL · min) ⁻¹	3.0

控制球盘磨损机的盘试样做匀加速和匀减速交替旋转运动,以模拟抽油杆柱上下往复运动,采用油管试样替代球且保持静止,与盘试样产生相对滑动,实验用盘与油管试样的材料类型分别为 J55 和 P110、表面硬度分别为 HRC55-62 和 13C_r、粗糙度皆为 $3.2\text{ }\mu\text{m}$,并且盘试样的直径为 $\Phi 130$,油管试样

的曲率半径 $R76.25$ 。采用透明基础油和原油的混合油液作为球盘磨损机润滑剂,利用 $1\text{ }\mu\text{m}$ 工业过滤器和永磁铁滤除原油中的固体杂质和铁磁性颗粒,过滤后的原油作为实验用纯黑油。将 400 mL 基础油作为球盘摩擦副的润滑剂,磨损每进行 30 min ,向基础油中加入 30 mL 纯黑油形成不同比例混合油液,搅拌纯黑油与基础油,确保油样混合均匀。采用 UV3600 紫外可见分光光度计(光度测量误差为 $\pm 0.3\%$)分别测得其油液衰减系数,如图 7 所示。

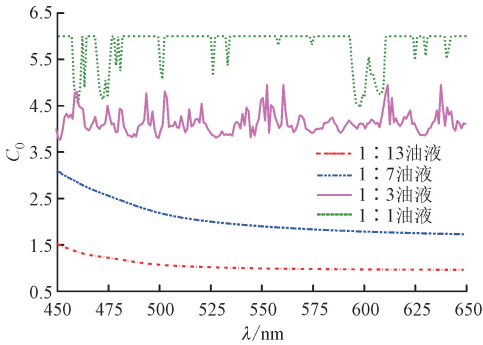
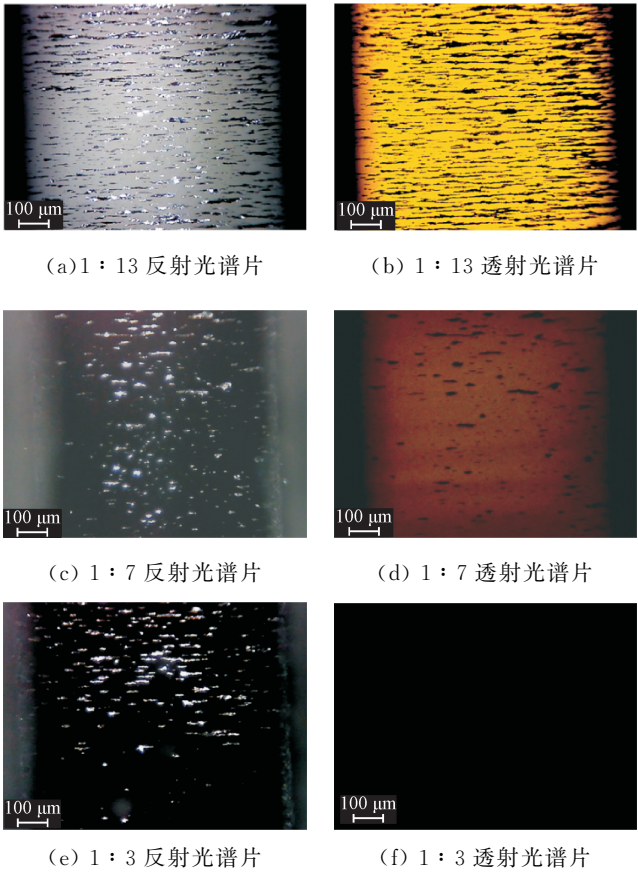
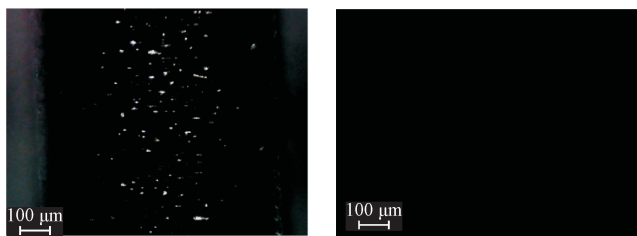


图 7 不同比例混合油液的油液衰减系数曲线
Fig. 7 Oil attenuation coefficient curves for different mixed oils

由图 7 可知,第 1 次加入 30 mL 纯黑油之后,混合油液中纯黑油与基础油的比例约为 $1:13$,主波长 500 nm 时的油液衰减系数约为 $1.15(1\pm 0.3\%)$,由于漫反射光可透过油层在 CMOS 像面形成明亮背景,实现磨粒明场显微成像。不同比例混合油液的反射光谱片如图 8 所示。反射光谱片中黑色磨粒图像清晰可辨,部分磨粒产生反光,透射光谱片中投影成像的磨粒辨识度较高;从 30 min 开始进行第 2 次补油,混合油液比例增大至 $1:7$ 左右,主波长附近的油液衰减系数增至 $2.28(1\pm 0.3\%)$,由于漫反射光在油层中被大量吸收消耗,导致 CMOS 像面反差透视比减小,造成反射光谱片中背景与磨粒图像对比度降低,磨粒图像辨识难度增大,并且透射光谱片中背景与磨粒图像对比度急剧降低,磨粒图像无法有效识别;从 60 min 开始进行第 3 次补油,此时纯黑油与基础油的混合比例约为 $1:3$,其油液衰减系数增至 $3.86(1\pm 0.3\%)$,漫反射光与前向、后向散射光能量被大量吸收,致使磨粒与黑色背景之间的图像对比度增强,反射光谱片中大磨粒与磨粒链识别度较高,然而由于混合油液透光率过低,造成 CMOS 感光面接受的透射光强度小于其感光灵敏度,透射光谱片中磨粒与背景的图像对比度为零,此

时透射光磨粒成像失效;实验进行至 90 min 时第 4 次补油,混合油液比例约为 $1:1$,在 500 nm 主波长测试光下油液衰减系数突变为 $5.41(1\pm 0.3\%)$,进入油层的漫反射光与前向、后向散射光被彻底吸收,反射光谱片中黑色背景相对于磨粒的图像对比度进一步提高,暗场显微成像的磨粒轮廓及形貌特征突出且清晰度高,谱片中磨粒沉积量却减少,表明磨损强度降低。此外,第 4 次补油之后,混合油液中纯黑油比例接近 50% ,油液衰减系数曲线的部分数据值已超出紫外可见分光光度计的测试量程而被消除。随着混合油液比例由 $1:13$ 增大至 $1:7$ 时,直接反射 OLVF 进行磨粒明场显微成像,反射光谱片中背景与磨粒之间的图像对比度逐渐降低;当混合油液比例由 $1:7$ 增大至 $1:3$ 时,直接反射 OLVF 进行磨粒暗场显微成像,黑色背景与磨粒表面的反差透视比差值急剧增大,反射光谱片图像对比度显著提高;当混合油液比例由 $1:3$ 增大至 $1:1$ 时,黑色背景与磨粒表面的反差透视比差值无明显变化,说明当油液衰减系数大于 3.86 时,混合油液透光度对直接反射 OLVF 磨粒暗场显微成像清晰度几乎无影响,与仿真结果基本一致。





(g) 1:1 反射光谱片

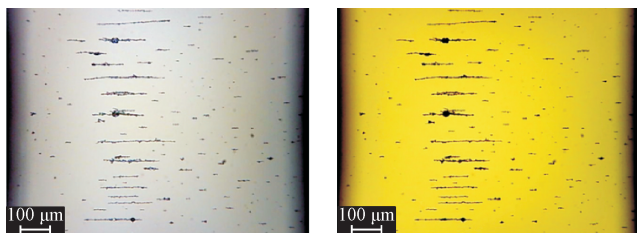
(h) 1:1 透射光谱片

图8 不同比例混合油液的光谱片

Fig. 8 Ferrograms captured from different mixed oils

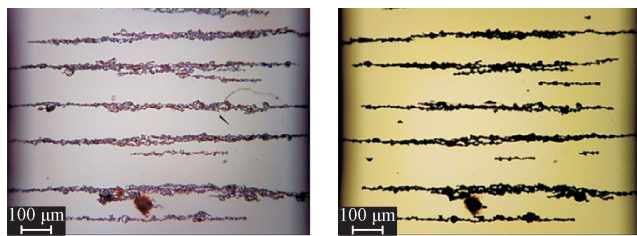
润滑油成分、温度及水分含量是影响油液衰减系数与后向散射角的重要因素。随着温度升高润滑油黏度减小,当油液成分中抗氧化剂含量较少时,长期高温状态下油质劣化,若油液中存在溶解水、游离水以及污染物,将加速油液变质^[27-28],导致润滑油颜色变深且透光度减小,增大了油液衰减系数。同时,极端温度下油液黏度降低,加之水分和气泡会造成油液折射率减小,光线由变质油液进入空气中全反射光能量损耗变大,并且污染物的存在将进一步增大散射光强度,使得油液中光线后向散射角对直接反射 OLVF 显微成像清晰度的影响显著减小。

为此,本文采用不同颜色的在用液压油、齿轮油和柴油机油作为测试油样,在 2.2 光学倍率条件下获取 3 种油样磨粒沉积谱的反射光与透射光谱片,验证直接反射 OLVF 显微成像系统性能,测试结果如图 9 所示。可见,直接反射 OLVF 显微成像系统能够从油液衰减系数小于 2.0 的液压油和齿轮油中获取明场成像的磨粒谱片,液压油谱片中小磨粒图像清晰可辨,齿轮油谱片中大磨粒及磨粒链的轮廓及形态特征辨识度较高,其颜色清晰可见。由图 9(e)、9(f)可知,直接反射 OLVF 可从油液衰减系数大于 5.0 的柴油机油中可靠获得暗场成像的反射光谱片,由于高速重载油液氧化,加之大量积碳溶入,导致柴油机油变黑,其吸光损耗造成光线无法透过油层而形成黑色背景,使得反射光谱片中磨粒图像可清晰辨别,透射光谱片中磨粒视觉信息不可见。测试结果表明,直接反射 OLVF 显微成像系统可以探测不同透光度油液的金属磨粒,这与仿真结果相符,进一步验证了本文显微成像模型之普适性和有效性。



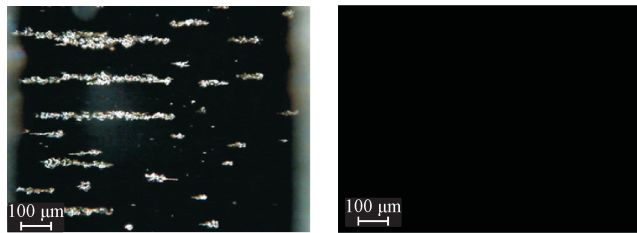
(a) 液压油反射光谱片

(b) 液压油透射光谱片



(c) 齿轮油反射光谱片

(d) 齿轮油透射光谱片



(e) 柴油机油反射光谱片

(f) 柴油机油透射光谱片

图9 不同颜色油样的直接反射 OLVF 光谱片

Fig. 9 Direct-reflection OLVF ferrograms for different coloured oil samples

此外,由于显微镜镜头场曲像差的存在,造成靠近反射光谱片边缘视场区域的磨粒显微图像清晰度和辨识度较低,而轴上像点附近的中心视场区域可获得最佳磨粒暗场显微成像质量,实验测试与仿真结果相一致。综上所述,直接反射 OLVF 暗场显微成像可从透光和不透光油液中有效获取较高清晰度的磨粒反射光谱片,尤其能够解决黑色油液中金属磨粒探测问题,使得采油装备磨损监测成为可能。

4 结 论

(1) 本文设计了直接反射在线可视铁谱显微成像系统,建立了直接反射 OLVF 磨粒暗场显微成像模型。以此为基础,仿真分析了光学倍率、油液衰减系数和后向散射角变化对 CMOS 像面反差透视比的影响规律,确定了直接反射 OLVF 显微成像系统的光学倍率为 2.2 和磨粒暗场显微成像的油液衰减系数须大于 2.0。仿真结果表明:油液衰减系数与后向散射角越大,CMOS 像面磨粒与背景的图像对比度越高;当油液衰减系数大于 5.0 时,CMOS 像面边缘视场区域的反差透视比值在 0.816~0.844 范围内变化,此时油液衰减系数与后向散射角变化对磨粒暗场显微成像清晰度的影响减小;磨粒沉积于显微成像系统的主光轴附近,有助于提高油液中磨粒暗场显微成像清晰度。

(2) 原油介质条件下磨粒图像采集实验结果表明:直接反射 OLVF 暗场显微成像能够从油液衰减系数大于 2.28 的混合油液中有效获取磨粒视

觉信息,油液衰减系数越大反射光谱片中磨粒图像清晰度越高,反射光谱片中心视场区域可获得最佳磨粒暗场显微成像质量,与仿真计算结果基本一致。

(3)不同润滑油介质下磨粒图像采集实验结果表明,直接反射 OLVF 能够从液压油、齿轮油及柴油机油中捕获磨粒图像信息,实验测试与仿真结果相符,验证了本文模型的普适性和有效性。

(4)本文模型可定量评价磨粒暗场显微成像清晰度,指导直接反射 OLVF 显微成像系统优化设计,对于采用光学成像原理探测原油中金属磨粒,实现油气井采油系统智能监测具有一定的工程意义和应用价值。

参考文献:

- [1] BELLOW D G, OWENS D C, SMUGA-OTTO I. Wear of standard and hard-metal-coated couplings with oilfield tubing [J]. *Wear*, 1989, 133(1): 83-93.
- [2] CAO Wei, DONG Guangneng, CHEN Wei, et al. Multisensor information integration for online wear condition monitoring of diesel engines [J]. *Tribology International*, 2015, 82(part A): 68-77.
- [3] SUN Jiayi, WANG Liming, LI Jianfeng, 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.
- [4] WU T H, MAO J H, WANG J T, et al. A new on-line visual ferrograph [J]. *Tribology Transactions*, 2009, 52(5): 623-631.
- [5] LI Bo, WU Wei, ZHOU Mi, et al. A full field-of-view online visual ferrograph debris detector based on reflected light microscopic imaging [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(15): 16584-16597.
- [6] 李博,袁勋,吴伟,等. 气泡强干扰小波调制的全视场在线可视铁谱磨屑图像分割算法 [J]. *机械工程学报*, 2024, 60(15): 160-172.
LI Bo, YUAN Xun, WU Wei, et al. Wear debris image segmentation algorithm based on wavelet modulation of strong bubble interference for full field-of-view online visual ferrograph [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(15): 160-172.
- [7] ZHU Xiaoliang, ZHONG Chong, ZHE Jiang. Lubricating oil conditioning sensors for online machine health monitoring-a review [J]. *Tribology International*, 2017, 109: 473-484.
- [8] 李博,冯松,毛军红. 在线图像可视铁谱 LED 阵列反射光源设计与实现 [J]. *西安交通大学学报*, 2014, 48(10): 29-34.
- LI Bo, FENG Song, MAO Junhong. A design method and its implementation of an LED array reflecting light for on-line visual ferrograph [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2014, 48(10): 29-34.
- [9] 李博,冯松,毛军红. 在线图像可视铁谱成像系统的像面照度均匀性 [J]. *光学精密工程*, 2016, 34(10): 2347-2356.
LI Bo, FENG Song, MAO Junhong. Illumination uniformity of an imaging system for on-line visual ferrograph [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 34(10): 2347-2356.
- [10] MAO Junhong, LI Bo, FAN Bin, et al. Debris direct reflection embedded microscope for on-line visual ferrograph: US 2018/0129029 A1[P]. 2018-05-10.
- [11] LI Bo, XI Yinhu, FENG Song, et al. A direct reflection OLVF debris detector based on dark-field imaging [J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(6): 065104.
- [12] HAIDEN C, WOPELKA T, JECH M, et al. A microfluidic chip and dark-field imaging system for size measurement of metal wear particles in oil [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(5): 1182-1189.
- [13] 刘志群,易定容,孔令华,等. 基于并行共聚焦显微系统的物方差动轴向测量 [J]. *光学精密工程*, 2017, 25(6): 1449-1457.
LIU Zhiqun, YI Dingrong, KONG Linghua, et al. Object-side based differential axial measurement based on parallel confocal microscopy [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(6): 1449-1457.
- [14] 张雅丽,余卿,程方,等. 基于 regionprops 函数的并行彩色共聚焦测量系统的三维重构 [J]. *光学精密工程*, 2022, 30(1): 45-55.
ZHANG Yali, YU Qing, CHENG Fang, et al. Three-dimensional reconstruction for parallel chromatic confocal measurement system based on regionprops function [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(1): 45-55.
- [15] 宋祥磊,李舒,顾梦涛,等. 光场显微成像微尺度流场三维重建方法研究 [J]. *光学学报*, 2019, 39(10): 160-169.
SONG Xianglei, LI Shu, GU Mengtao, et al. Three-dimensional reconstruction of micro-scale flow field based on light field microscopic imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(10): 160-169.
- [16] JAFFE J S. Computer modeling and the design of optimal underwater imaging systems [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1990, 15(2): 101-111.

- [17] 李博, 吕浩文, 吴伟, 等. 全视场在线图像可视铁谱磨粒显微成像特性分析 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(2): 26-35.
- LI Bo, LÜ Haowen, WU Wei, et al. Evaluation and analysis of microscopic imaging characteristics of wear debris for full field-of-view online visual ferrograph [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(2): 26-35.
- [18] MCGLAMERY B L. Computer analysis and simulation of underwater camera system performance [EB/OL]. [2024-06-06]. https://misclab.umeoce.maine.edu/education/VisibilityLab/reports/SIO_75-2.pdf.
- [19] MCGLAMERY B L. A computer model for underwater camera systems [C]//Ocean Optics VI. Bellingham, WA, USA: SPIE, 1980: 221-231.
- [20] DAUSINGER F, SHEN Jialin. Energy coupling efficiency in laser surface treatment [J]. ISIJ International, 1993, 33(9): 925-933.
- [21] 李博. 在线铁谱嵌入式显微成像技术与实验研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2018.
- [22] MOREL A, GENTILI B. Diffuse reflectance of oceanic waters: its dependence on sun angle as influenced by the molecular scattering contribution [J]. Applied Optics, 1991, 30(30): 4427-4438.
- [23] BOSS E, PEGAU W S. Relationship of light scattering at an angle in the backward direction to the back-scattering coefficient [J]. Applied Optics, 2001, 40(30): 5503-5507.
- [24] JAFFE J S. Underwater optical imaging: the past, the present, and the prospects [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2015, 40(3): 683-700.
- [25] SCHETTINI R, CORCHS S. Underwater image processing: state of the art of restoration and image enhancement methods [J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2010, 2010(1): 746052.
- [26] SHAW P J, RAWLINS D J. The point-spread function of a confocal microscope: its measurement and use in deconvolution of 3-D data [J]. Journal of Microscopy, 1991, 163(2): 151-165.
- [27] DU Ying, WU Tonghai, GONG Renjie. Properties of water-contaminated lubricating oil: variation with temperature and small water content [J]. Tribology-Materials, Surfaces & Interfaces, 2017, 11(1): 1-6.
- [28] DU Ying, DUAN Chaoqun, WU Tonghai. Replacement scheme for lubricating oil based on Bayesian control chart [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-10.

(编辑 赵炜)