

表面修饰 ZnS 纳米材料的摩擦学行为研究

王兰美, 钱建华, 张丹, 李君华*

(辽宁石油化工大学石油化工学院, 辽宁抚顺 113001)

摘要:通过水热法合成了聚乙二醇 4000 (PEG 4000) 和油酸 (OA) 表面修饰的 ZnS 纳米材料, 利用 XRD、SEM 和 TEM 分析了改性 ZnS 纳米结构的组成和形貌; 用 UV-Vis 考察了 PEG 4000 和 OA 对 ZnS 改性润滑油分散悬浮性能的影响; 同时研究了 PEG 4000 和 OA 对 ZnS 纳米颗粒作润滑油添加剂的减摩抗磨性能的影响。结果表明, 水热改性合成的产物为小尺寸的球状 ZnS 纳米材料; 与未加改性剂的 ZnS 纳米颗粒相比, PEG 4000 和 OA 的加入使 ZnS 均匀分散在 150SN 基础油中, 团聚问题得到明显改善, 从而提高了润滑油的摩擦学性能; 当 ZnS/PEG 4000 和 ZnS/OA 作添加剂时, 润滑油的平均摩擦系数和磨斑直径比 150SN 基础油分别降低了 31.56%、21.33% 和 47.12%、24.75%。

关键词:硫化锌; 纳米材料; 表面改性; 润滑油添加剂; 摩擦学性能

中图分类号: O614.6

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2025)S1-0151-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.S1.028

Study on tribological behavior of surface-modified ZnS nanomaterials

WANG Lan-mei, QIAN Jian-hua, ZHANG Dan, LI Jun-hua*

(School of Petrochemical Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun 113001, China)

Abstract: ZnS nanomaterial, with its surface being respectively modified by polyethylene glycol 4000 (PEG 4000) and oleic acid (OA), is synthesized via hydrothermal method. The impacts of PEG 4000 and OA respectively on the dispersion and suspension properties of ZnS modified lubricant are evaluated by means of ultraviolet spectrophotometer, and the effects of PEG 4000 and OA separately on the anti-friction and anti-wear properties of ZnS nanoparticles as lubricant additives are studied. It is verified that the obtained product is small-size spherical ZnS nanomaterial. Compared with ZnS nanoparticles without modification, the addition of either PEG 4000 or OA makes ZnS evenly disperse in 150SN base oil, and the agglomeration problem is basically solved, thereby improving the tribological properties of lubricant oil. The average friction coefficient and wear scar diameter of lubricant oil decline by 31.56% and 21.33%, respectively compared with 150SN base oil when ZnS/PEG 4000 is used as lubricant additive, those decline 47.12% and 24.75%, respectively when ZnS/OA is used as lubricant additive.

Key words: zinc sulfide; nanomaterials; surface modification; lubricant additives; tribological properties

由于纳米效应, 纳米粒子在润滑油中极易团聚, 不通过表面功能化直接合成的纳米颗粒作为添加剂直接加入到润滑油时, 会因为其高表面能而产生团聚, 进一步导致纳米颗粒在润滑油中的分散稳定性差^[1-8]。因此, 研究人员正致力于寻找一种能有效改善纳米颗粒在润滑油中稳定分散的方法。常见的解决方式是对纳米颗粒进行表面改性。通过表面活性剂进行包覆或吸附, 可以有效降低纳米粒子的表面能, 进而提高其在润滑油中的分散稳定性^[1, 9-15]。聚乙二醇 4000 (PEG 4000) 作为一种非离子表面活性剂, 具有良好的润滑性, 有助于降低摩擦, 其抗聚集特性是由于吸附在纳米粒子上通过空间位阻稳定机制发挥作用, 防止颗粒间的聚集^[16-18]。油酸 (OA) 作为一种重要的天然化学物质, 被广泛应用

于颗粒表面改性, 不仅因为其成本低廉, 而且能稳定地吸附在颗粒表面, 减缓粒子间的团聚现象, 且在颗粒外部形成紧密的包覆保护膜, 能防止颗粒氧化^[19-26]。

因此, 本研究拟采用 ZnS 为润滑油添加剂、PEG 4000 和 OA 为表面活性剂, 考察不同改性剂对 ZnS 的微观结构、减摩抗磨性能的影响, 旨在为纳米材料作润滑油助剂的开发和应用提供有益的指导。

1 实验部分

1.1 试剂

无水乙醇、乙酸锌、硫化钠、PEG 4000、OA、石油醚 (沸程 60~90℃) 均为分析纯; 蒸馏水为自制; 150SN 基础油。

收稿日期: 2024-05-16; 修回日期: 2024-11-20

基金项目: 辽宁省科技厅揭榜挂帅科技攻关专项 (2021JH1/10400090); 中央引导地方科技发展项目 (2023JH6/100100047); 抚顺市“抚顺英才计划”项目 (FSYC202201001)

作者简介: 王兰美 (1997-), 女, 硕士生, 研究方向为纳米材料润滑油添加剂, wwanmei@163.com; 李君华 (1982-), 男, 博士, 教授, 研究方向为烯烃聚合、润滑油助剂以及芳烃高值化利用, 通讯联系人, lijunhua0521@163.com。

1.2 ZnS/PEG 4000 纳米颗粒的制备

采用水热法制备 ZnS/PEG 4000 材料。首先,将 0.62 g $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 和 0.76 g $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 溶解于 50 mL 乙醇和水(体积比 1:1)混合溶剂中,加入一定量的改性剂 PEG 4000,在室温下磁力搅拌至完全溶解,后将混合溶液转移至反应釜中,于烘箱 160℃ 反应 12 h。待反应完成,经过离心(8 000 r/min, 3 min)、水洗和醇洗数次,最后将沉淀物放在 60℃ 的真空干燥箱中干燥 12 h,研磨得到 ZnS/PEG 4000 纳米材料。

1.3 ZnS/OA 纳米颗粒的制备

称取 0.62 g $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 和 0.76 g $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, 加入到乙醇和水(体积比 1:1)混合溶剂中,配制成 50 mL 溶液。然后再向此溶液中加入一定量的改性剂 OA,室温下搅拌一定时间,置于水热反应釜中。将反应釜在烘箱中 160℃ 条件下加热 12 h。将反应后的浊液离心(8 000 r/min, 3 min)处理,并经水洗、醇洗,最后置于真空干燥箱中,在 60℃ 干燥 12 h,即得最终 ZnS/OA 纳米材料。

1.4 ZnS/PEG 4000 和 ZnS/OA 纳米材料油样的制备

将相同质量分数的未改性 ZnS、ZnS/PEG 4000 和 ZnS/OA 纳米材料加入到 150SN 基础油中,超声分散 30 min 后室温搅拌 60 min,获得分散性良好的混合润滑油。

1.5 摩擦学性能测试及表征分析

1.5.1 摩擦学性能测试

选用杠杆四球摩擦磨损试验机考察所制备的纳米材料作润滑剂在基础油中的减摩抗磨性能,并与基础油的润滑效果进行比较。实验之前,将 GCr15 钢球(硬度为 58~62 HRC,直径为 12.7 mm)、夹具以及油盒用石油醚清洗,组装油杯,将油样倒入油杯中,安装在油座上。实验结束,获得摩擦系数曲线,将油盒中的油样倒掉并把钢球表面的油污擦净,将其固定在光学显微镜底座上,测量下部钢球的磨斑直径,记录并比较结果,最后,使用扫描电子显微镜和能谱仪对实验钢球磨痕区域进行表征。

1.5.2 表征分析

采用高分辨 X 射线衍射仪对所制得的样品粉体进行物相分析;用傅里叶变换红外光谱仪对样品的分子结构和样品成分进行定性定量分析;用扫描电镜和透射电镜对纳米颗粒的形貌和粒度进行测定;使用扫描电镜对钢球表面的磨斑进行形貌观察,利用能谱仪分析了钢球磨损表面摩擦保护膜的化学

成分。

1.5.3 分散稳定性测试

通过自然沉降法和紫外可见分光光度计测量添加剂在 150SN 基础油中的分散性和稳定性。使用紫外可见分光光度计对静置不同时间的上层清液在 334 nm 波长(最佳吸收波长)下进行吸光度测试。根据比尔-朗伯定律,由式(1)可知油样吸光度大小和浓度成正比,油样吸光度越大,添加剂浓度就越大,表明添加剂在 150SN 基础油中的分散稳定性越好。

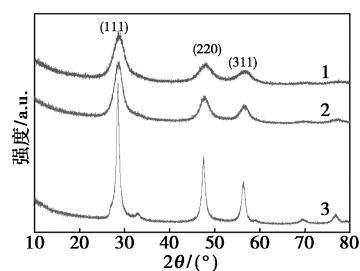
$$A = Kbc \quad (1)$$

式中:A 为吸光度;K 为摩尔吸光系数, $\text{L}/(\text{g} \cdot \text{cm})$; b 为吸收层厚度, cm; c 为吸光物质的质量浓度, g/L 。

2 结果与讨论

2.1 XRD 分析

利用高分辨 X 射线衍射仪探究样品内部结晶结构的变化,结果如图 1 所示。由图 1 可以看出, ZnS 晶面(111)、(220)和(311)的衍射峰分别出现在 $2\theta = 28.530^\circ$ 、 47.454° 和 56.307° 的位置,与立方相 ZnS 的标准卡片(JCPDS 77-2100)相一致。经过 PEG 4000、OA 改性处理后,衍射峰的位置未发生改变,样品的特征峰峰值逐渐变强,表明改性 ZnS 的结晶度更好。



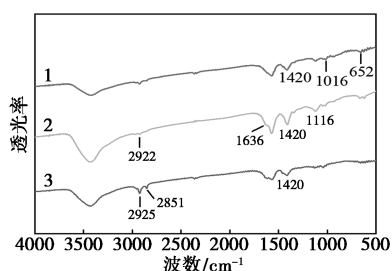
1—ZnS; 2—ZnS/PEG 4000; 3—ZnS/OA

图 1 ZnS、ZnS/PEG 4000 和 ZnS/OA 的 XRD 图

2.2 FT-IR 分析

图 2 为改性前后 ZnS 的红外光谱图。在红外光谱图中,未改性的 ZnS 在 $1\ 420$ 、 $1\ 016$ cm^{-1} 和 652 cm^{-1} 处出现特征吸收峰。经 PEG 4000 和 OA 改性过后,分别在 $2\ 922$ 、 $1\ 636$ 、 $1\ 116$ 、 $2\ 925$ cm^{-1} 及 $2\ 851$ cm^{-1} 出现了 PEG 4000 的 $-\text{CH}_2-$ 、 $\text{C}=\text{C}$ 、 $-\text{C}-\text{O}-\text{C}-$ 的振动吸收峰和 OA 的 $-\text{CH}_2-$ 、 $-\text{CH}_3$ 振动吸收峰,同时在 $1\ 420$ cm^{-1} 处出现 ZnS 的特征峰,且在改性后的纳米材料 ZnS/PEG 4000

中, 3426 cm^{-1} 处—OH 的拉伸振动吸收峰宽化, 说明—OH 的 H 原子形成了氢键^[27], 而在 ZnS/OA 材料中没有出现 1709 cm^{-1} 处羰基的伸缩振动峰, 说明改性样品中已经不存在 C=O 基团, 加入的表面改性剂的羰基在纳米材料的表面以氢键键合发生了化学吸附, ZnS 纳米粒子被改性剂包覆, 在材料表面形成疏水亲油的修饰层, 同时降低了纳米颗粒的表面能, 防止小尺寸的纳米材料发生团聚, 从而使纳米材料能稳定分散在润滑油中。

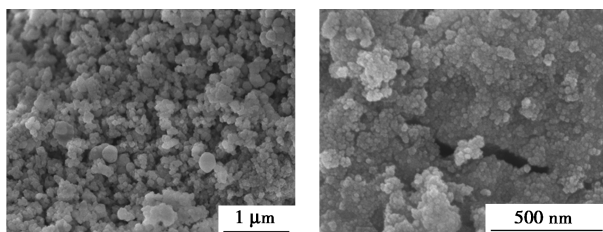


1—ZnS; 2—ZnS/PEG 4000; 3—ZnS/OA

图2 ZnS、ZnS/PEG 4000 以及 ZnS/OA 复合材料 FT-IR 图

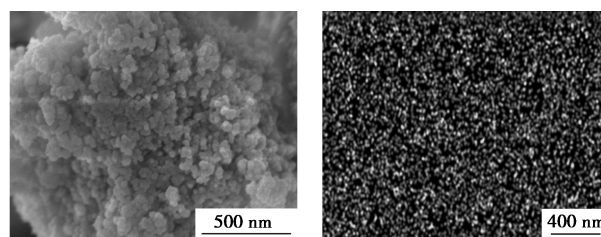
2.3 微观形貌分析

为分析表面修饰对 ZnS 形貌的影响, 对改性前后的 ZnS 样品进行 SEM 表征, 图 3 为 ZnS、ZnS/PEG 4000 和 ZnS/OA 的 SEM 图及 ZnS/OA 的元素面分布图。从图 3(a) 可以看出未改性 ZnS 纳米颗粒接近球形或类球形, 颗粒之间聚集性高, 粒径大小不一, 平均粒径约为 $40\sim 80\text{ nm}$ 。图 3(b)、(c) 中改性 ZnS 出现尺寸均一的球状结构, 粒径大小为 23 nm , 晶粒分布均匀, 说明 PEG 4000 和 OA 的添加在反应体系中通过化学吸附包覆在 ZnS 表面, 增强了粒子间的空间位阻效应, 有效降低了 ZnS 的团聚现象。图 3(d)、(e) 为 ZnS/OA 的元素面分布图, 可以看到 Zn 和 S 元素分布比较均匀, 说明改性过后 Zn 和 S 元素在样品中分布均匀性较好。图 4 为 ZnS/OA 的 TEM 和 HRTEM 图片, 可以清晰观察到样品球形度较高, 且平均粒径为 15 nm 左右。图中有两种不同晶格间距 0.160 nm 和 0.313 nm , 分别对应 ZnS 的 (111) 和 (311) 晶面。



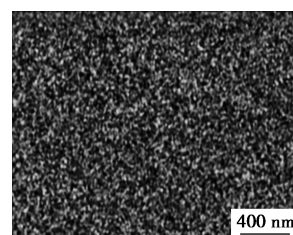
(a) ZnS

(b) ZnS/PEG 4000



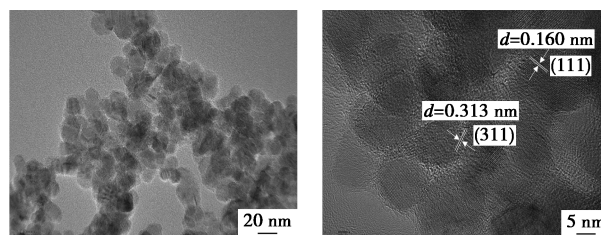
(c) ZnS/OA

(d) Zn 的元素面分布图



(e) S 的元素面分布图

图3 ZnS、ZnS/PEG 4000 和 ZnS/OA 的 SEM 图和 ZnS/OA 的元素面分布图



(a) TEM 图

(b) HRTEM 图

图4 ZnS/OA 的 TEM 和 HRTEM 图

2.4 分散稳定性分析

将一定量的 ZnS、ZnS/PEG 4000 以及 ZnS/OA 纳米颗粒加入 150SN 基础油中, 配制成相同质量分数的 ZnS、ZnS/PEG 4000、ZnS/OA 混合润滑油, 将混合润滑油超声 30 min 以使纳米颗粒较好地分散于 150SN 中。使用磁力搅拌器室温搅拌 60 min , 通过自然沉降法和紫外可见分光光度计测量吸光度法观察 3 种纳米颗粒在 150SN 基础油中静置不同时间的分散稳定性。

图 5 为 3 种样品在室温下分别静置 $12、48\text{ h}$ 和 144 h 的数码照片。可以看出, 3 种纳米颗粒经过超声搅拌后均能够在润滑油中稳定分散, 室温放置 12 h 后, 3 种样品均未出现沉降; 保持到 48 h , 没有观察到明显的沉淀; 时间达到 144 h 后, 能看到样品瓶底部出现微量白色沉淀。通过紫外分光光度计选取 3 种纳米颗粒静置不同时间的上层清液进行测试, 如图 6 所示。随着时间的增加, 3 种纳米颗粒在润滑油中不能长时间内保持均匀分散状态。图 6 中 OA 改性后纳米 ZnS 颗粒的吸光度变化比未改性和 PEG 4000 改性的纳米材料降幅小, 这可能跟 OA 的

结构有关,OA 分子中双键的存在引起空间结构的弯曲,产生空间壁垒,因而具有较大的空间位阻,能有效防止纳米粒子团聚,能够较好地保持纳米 ZnS 的均匀分散状态。

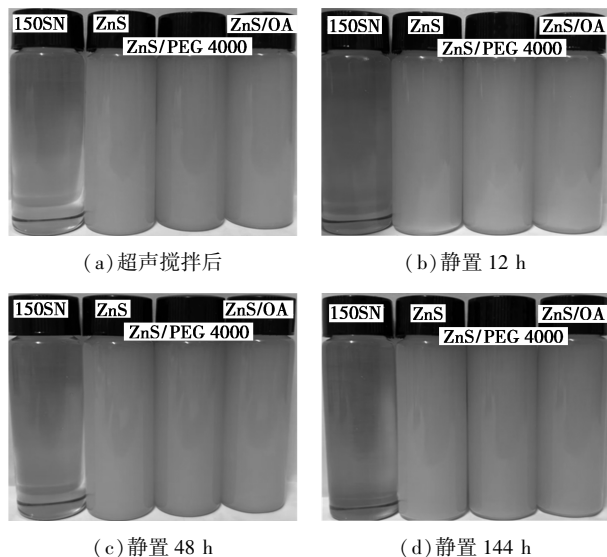


图 5 ZnS、ZnS/PEG 4000 和 ZnS/OA 纳米材料在 150SN 基础油中的分散能力

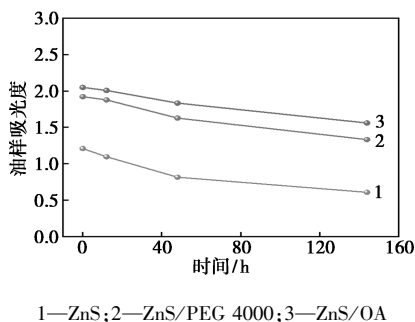


图 6 ZnS、ZnS/PEG 4000 和 ZnS/OA 油样的紫外可见光吸光度随时间变化

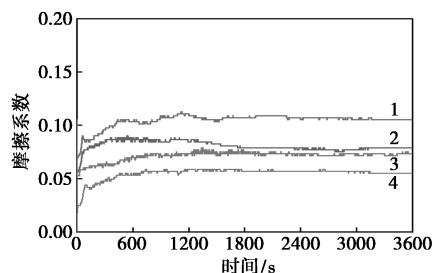
2.5 改性硫化物对润滑油摩擦学性能的影响

2.5.1 稳定性实验

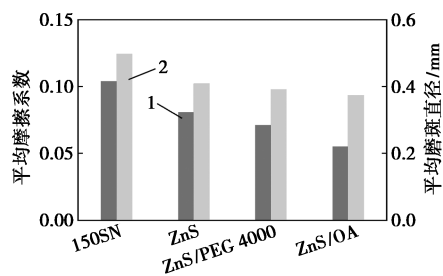
为探究 PEG 4000 和 OA 的加入对 ZnS 减摩抗磨的影响,用四球摩擦磨损试验机考察了在室温、392 N、1 200 r/min 条件下,添加相同质量分数的 ZnS、ZnS/PEG 4000 和 ZnS/OA 纳米材料的混合润滑油的摩擦性能,同时与 150SN 基础油摩擦性能进行对比。如图 7(a) 所示,150SN 基础油摩擦系数最大,且在 1 600 s 前数值波动较大。在基础润滑油中添加改性过的纳米材料后,摩擦系数在 0~600 s 缓慢增加,600 s 后稳定在一个较低的值,比未改性的 ZnS 更加平稳,这是因为改性的 ZnS 与基础油的油溶性更好,减摩效果更加理想。这些结果证实,与 150SN 基础油和未改性纳米 ZnS 混合润滑油相比,

ZnS/PEG 4000 和 ZnS/OA 混合润滑油在减摩抗磨方面的积极作用更为明显。

由图 7(b) 可知,在最佳改性 ZnS/OA 下平均摩擦系数和磨斑直径分别为 0.056 mm 和 0.374 mm,比 150SN、未改性的 ZnS 和 ZnS/PEG 4000 分别降低了 47.12% 和 24.75%、31.91% 和 8.56%、22.73% 和 4.35%,说明 OA 改性 ZnS 具有良好的摩擦学性能,可能因为 ZnS/OA 在 150SN 基础油中的分散稳定性更好,使得减摩抗磨性能得到增强。



1—150SN;2—ZnS;3—ZnS/PEG 4000;4—ZnS/OA
(a) 摩擦系数曲线



1—平均摩擦系数;2—平均磨斑直径
(b) 平均摩擦系数和平均磨斑直径

图 7 150SN 基础油、ZnS、ZnS/PEG 4000 和 ZnS/OA 油样的摩擦系数曲线图及平均摩擦系数和平均磨斑直径图

2.5.2 摩擦磨损表面分析

为进一步观察 PEG 4000 和 OA 改性 ZnS 的润滑效果,采用 SEM 在不同放大倍数下对 150SN 基础油、未改性 ZnS、ZnS/PEG 4000 和 ZnS/OA 的下部钢球表面磨损形貌进行分析,结果如图 8 所示。图 8(a)、(b) 中 150SN 基础油润滑的钢球表面粗糙且不平整,存在大量凹坑,磨损程度严重;图 8(c)、(d) 中添加未改性 ZnS 后钢球表面粗糙程度得到一定改善,犁沟和凹坑明显减少,磨损程度较 150SN 基础油温和;图 8(e)、(f) 和图 8(g)、(h) 显示出两种改性 ZnS 润滑的钢球表面磨损微观形貌的不同,随着改性剂的加入,钢球摩擦表面缺陷部位减少,犁沟明显变浅,说明改性 ZnS 纳米颗粒对犁沟具有自填充作用。与 ZnS/PEG 4000 相比,经过 OA 改性 ZnS 润

滑的钢球表面较光滑,原因可能是在润滑过程中,分散性较好的 ZnS/OA 扩散到摩擦副的摩擦区,与摩擦表面发生化学反应,形成化学反应膜,对摩擦副表面起到有效的保护作用,在摩擦过程中会降低摩擦副表面的磨损,从而提高抗磨性能。

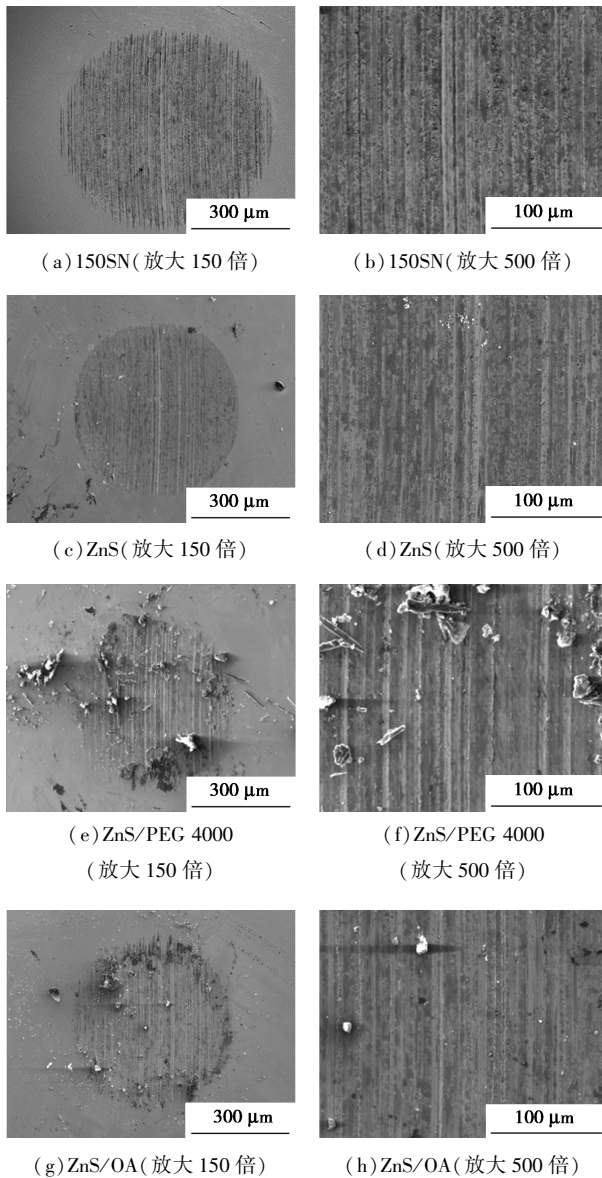


图 8 150SN 基础油、ZnS、ZnS/PEG 4000 和 ZnS/OA 油样润滑的钢球摩擦表面 SEM 图

为进一步分析改性 ZnS 纳米材料在钢球表面的润滑机制,使用能谱仪对含有 ZnS/OA 纳米材料混合润滑油摩擦后的钢球表面典型元素进行分析,结果见图 9。可以看出,纳米 ZnS/OA 颗粒混合润滑油润滑下的钢球表面含有 Zn 和 S 等元素,说明在摩擦过程中,ZnS/OA 纳米材料在摩擦力作用下易形成具有减摩抗磨性能的润滑膜,沉积、吸附在钢球表面,有效阻挡摩擦副表面的摩擦,同时可以堵塞微划

痕,起到大幅度的润滑效果。

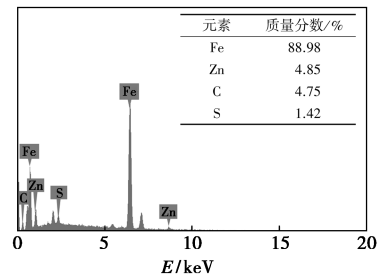


图 9 ZnS/OA 油样润滑的钢球摩擦表面 EDS 图

3 结论

本研究采用水热法制备了 ZnS/PEG 4000 和 ZnS/OA 纳米材料,对纳米材料的形貌和摩擦学性能进行了研究。得到以下结论:

(1) 通过水热法改性后,表面修饰的 ZnS 纳米颗粒的晶型结构没有发生明显的变化,平均粒径约为 23 nm 的球状结构。

(2) 配制了含 ZnS、ZnS/PEG 4000 和 ZnS/OA 的 3 种混合润滑油,得出 3 种油样的分散稳定性为 ZnS/OA>ZnS/PEG 4000>ZnS。

(3) 根据摩擦性能实验结果,PEG 4000 和 OA 改性 ZnS 用作润滑油添加剂,其平均摩擦系数和磨斑直径都显著降低,ZnS/PEG 4000 和 ZnS/OA 的摩擦学性能较佳,分别使润滑油的平均摩擦系数和磨斑直径降低了 31.56%、21.33% 和 47.12%、24.75%。两种添加剂对比,ZnS/OA 在润滑油中的摩擦学性能更突出,可能是因为 ZnS/OA 在润滑油中油溶性更好,增强了润滑油的摩擦学性能。

参考文献

- [1] Liu W M, Chen S. An investigation of the tribological behaviour of surface-modified ZnS nanoparticles in liquid paraffin [J]. *Wear*, 2000, 238(2): 120-124.
- [2] 周静芳, 张治军, 王晓波, 等. 油溶性铜纳米微粒作为液体石蜡添加剂的摩擦学性能研究 [J]. *摩擦学学报*, 2000, 20(2): 123-126.
- [3] 陈爽. 油酸修饰纳米粒子的摩擦学性能比较 [J]. *润滑与密封*, 2007, 32(2): 108-110.
- [4] 王士钊, 付洪瑞, 刘东志, 等. 油溶性纳米 ZnS 粒子的制备、表征及在油品中的分散稳定性 [J]. *军械工程学院学报*, 2007, 19(5): 70-72.
- [5] Li D D, Xie Y C, Yong H S, *et al.* Surfactant-assisted preparation of Y_2O_3 -stabilized ZrO_2 nanoparticles and their tribological performance in mineral and commercial lubricating oils [J]. *RSC Advances*, 2017, 7(7): 3727-3735.
- [6] Ghasemi R, Fazlali A, Mohammadi A H. Effects of TiO_2 nanoparticles and oleic acid surfactant on the rheological behavior

- of engine lubricant oil[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2018, 268: 925–930.
- [7] Jazaa Y, Sundararajan S. Influence of surfactants on the tribological behavior of nanoparticle additives under boundary lubrication conditions[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2021, 46(8): 1–9.
- [8] Hou X J, Guan W W, Jiang H, *et al.* Improving physicochemical and tribological characteristics of bio-lubricants using carbon-based hybrid nanomaterials modified by tertiary-butyl-hydroquinone[J]. *Tribology International*, 2024, 194: 109442.
- [9] 李久盛, 张立, 王会东. 硬脂酸修饰纳米 TiO₂ 颗粒的摩擦学性能研究: “第六届中国功能材料及其应用学术会议”论文集[C]. 武汉: 重庆仪器材料研究所, 2007.
- [10] 国秋菊, 郑少华, 苏登成. 用硅烷偶联剂修饰的纳米 Fe₃O₄ 粒子作为润滑油添加剂的摩擦学性能研究[J]. *润滑与密封*, 2007, 32(3): 113–117.
- [11] 苏登成, 郑少华, 陶文宏, 等. 硅烷偶联剂修饰纳米 ZrO 润滑油添加剂的摩擦学性能研究[J]. *润滑与密封*, 2007, 32(5): 112–115.
- [12] 张贤明, 杨小平, 欧阳平. 含铜微纳米粒子作为润滑油添加剂的研究进展[J]. *现代化工*, 2014, 34(8): 53–56.
- [13] Kumari S, Sharma O P, Gusain R, *et al.* Alkyl-chain-grafted hexagonal boron nitride nanoplatelets as oil-dispersible additives for friction and wear reduction[J]. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2015, 7(6): 3708–3716.
- [14] Guo J X, Barber G C, Schall D J, *et al.* Tribological properties of ZnO and WS₂ nanofluids using different surfactants [J]. *Wear*, 2017, 382: 8–14.
- [15] 冀光普, 何秀芳, 廖海峰, 等. 等离子体辅助球磨制备表面修饰片状纳米 Cu 粉及摩擦学性能[J]. *材料工程*, 2019, 47(6): 114–120.
- [16] Diez-Pascual A M, Diez-Vicente A L. PEGylated boron nitride nanotube-reinforced poly(propylene fumarate) nanocomposite biomaterials[J]. *RSC Advances*, 2016, 6(83): 79507–79519.
- [17] Liang W D, Wang L N, Zhu Z Q, *et al.* In situ preparation of polyethylene glycol/silver nanoparticles composite phase change materials with enhanced thermal conductivity[J]. *ChemistrySelect*, 2017, 2(12): 3428–3436.
- [18] Arrigo R, Antonioli D, Lazzari M, *et al.* Relaxation dynamics in polyethylene glycol/modified hydrocalcite nanocomposites [J]. *Polymers*, 2018, 10(11): 1182.
- [19] Harikrishnan S, Kalaiselvam S. Preparation and thermal characteristics of CuO-oleic acid nanofluids as a phase change material[J]. *Thermochimica Acta*, 2012, 533: 46–55.
- [20] Moreno M, Armentano I, Fortunati E, *et al.* Cellulose nano-biocomposites from high oleic sunflower oil-derived thermosets [J]. *European Polymer Journal*, 2016, 79: 109–120.
- [21] Li W, Cheng Z L, Liu Z. Synthesis and tribological behaviour of oleic acid-capped lanthanum borate/graphene oxide nanocomposites [J]. *Lubrication Science*, 2017, 29(1): 59–70.
- [22] Chen L J, Zhu D G. Preparation and tribological properties of unmodified and oleic acid-modified CuS nanorods as lubricating oil additives[J]. *Ceramics International*, 2017, 43(5): 4246–4251.
- [23] Gu C C. Modifying the lubricating and tribological properties via introducing the oleic acid in CuS nanomaterials for vehicle[J]. *Optics and Laser Technology*, 2018, 108: 1–6.
- [24] Gupta R, Pancholi K, Sa R, *et al.* Effect of oleic acid coating of iron oxide nanoparticles on properties of magnetic polyamide-6 nanocomposite[J]. *Jom the Journal of the Minerals Metals & Materials Society*, 2019, 71: 3119–3228.
- [25] Sun C M, Li J, Lin J H, *et al.* Effect of the structure and properties for carbon graphite materials with oleic acid modified multi-walled carbon nanotubes[J]. *Applied Physics A*, 2022, 128(10): 1–13.
- [26] Jiang H, Hou X J, Qian Y C, *et al.* A tribological behavior assessment of steel contacting interface lubricated by engine oil introducing layered structural nanomaterials functionalized by oleic acid[J]. *Wear*, 2023, 524: 204675.
- [27] 刘付胜聪, 肖汉宁, 李玉平, 等. 纳米 TiO₂ 表面吸附聚乙二醇及其分散稳定性的研究[J]. *无机材料学报*, 2005, 20(2): 310–316. ■
- (上接第 150 页)
- [17] Dante R C. Water photolysis by carbon nitride [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(38): 21030–21036.
- [18] Praus P. Photocatalytic nitrogen fixation using graphitic carbon nitride: A review[J]. *ChemistrySelect*, 2023, 8(1): 429–438.
- [19] Wudil Y S, Ahmad U F, Gondal M A, *et al.* Tuning of graphitic carbon nitride (g-C₃N₄) for photocatalysis: A critical review[J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2023, 16(3): 104542–104573.
- [20] Rono N, Kibet J K, Martincigh B S, *et al.* A review of the current status of graphitic carbon nitride[J]. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2020, 46(3): 189–217.
- [21] Changotra R, Guin J P, Khader S A, *et al.* Radiolytic degradation of ormidazole in aqueous solutions by electron beam irradiation: Implications to parameters, kinetics, toxicity and cost evaluation [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2020, 8(5): 104423–104433.
- [22] Liu R, Wang R, Lu J, *et al.* Degradation of AFB1 in aqueous medium by electron beam irradiation: Kinetics, pathway and toxicology[J]. *Food Control*, 2016, 66: 151–157.
- [23] Nguyen T K A, Pham T T, Nguyen-Phu H, *et al.* The effect of graphitic carbon nitride precursors on the photocatalytic dye degradation of water-dispersible graphitic carbon nitride photocatalysts[J]. *Applied Surface Science*, 2021, 537: 101315–101328.
- [24] Idrees I, Razzaq A, Zafar M, *et al.* Silver (Ag) doped graphitic carbon nitride (g-C₃N₄) photocatalyst for enhanced degradation of Ciprofloxacin (CIP) under visible light irradiation [J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2024, 17(3): 105615–105628.
- [25] Ma X, Zhou Y, Gu S, *et al.* Degradation of hexavalent chromium and methyl orange by the synergistic system of graphitic carbon nitride and electron beam irradiation [J]. *Chemosphere*, 2022, 287: 132228–132237.
- [26] Al-Asfar A, Zaheer Z, Aazam E S. Eco-friendly green synthesis of Ag@Fe bimetallic nanoparticles; Antioxidant, antimicrobial and photocatalytic degradation of bromothymol blue[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2018, 185: 143–152.
- [27] Actis A, Fornasiero P, Chiesa M, *et al.* Photo-induced radicals in carbon nitride and their magnetic signature[J]. *ChemPhotoChem*, 2024, 8(4): 203–215.
- [28] Zou L, Wang Y, Huang C, *et al.* Meta-cresol degradation by persulfate through UV/O₃ synergistic activation; Contribution of free radicals and degradation pathway[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 754: 142219–142227. ■