

非硫磷有机钼的摩擦学性能研究

戴媛静^{1,2}, 李小磊^{1,2}, 凌燕丽¹, 邹阳¹, 张继平¹, 张晨辉^{1,2}

(1.清华大学 摩擦学国家重点实验室, 北京 100084;
2.清华大学天津高端装备研究院 润滑技术研究所, 天津 300300)

摘要: **目的** 研究非硫磷有机钼的摩擦学性能, 以满足发动机润滑油低黏度化发展的需求。**方法** 实验室合成了一种新型不含硫磷元素的油溶性有机钼添加剂 (SPF Mo), 并将其按照不同质量分数添加到 0W20 润滑油中, 利用四球摩擦磨损试验机, 详细分析了不同 SPF Mo 添加量、温度、载荷和速度对 SPF Mo 在 0W20 中摩擦学性能的影响, 并采用 3D 激光共聚焦显微镜和扫描电子显微镜对磨痕形貌和成分进行分析。**结果** SPF Mo 具有优异的减摩抗磨性能, 可以使 0W20 的摩擦系数和磨斑直径均减小, 摩擦过程中 Mo 元素会发生富集, 生成包含 MoS₂、MoO₃ 等物质的摩擦化学反应膜, 从而实现减摩、抗磨和自修复。确定了 SPF Mo 在 0W20 中可以发挥良好摩擦学性能的添加量和使用温度区间分别为 0.25%~0.5% 和 100~130 ℃, 120 ℃ 时, 0.5% SPF Mo 能够使 0W20 润滑油的 COF 降低 27.5%, 磨斑直径降低 7.8%。0W20+0.5% SPF Mo 润滑油的 COF, 随着温度的升高先减小后增大, 随着转速的增大而减小, 随着载荷的增大而增大; 0W20+0.5% SPF Mo 润滑油的磨斑直径, 随着温度的升高先减小后增大, 随着转速和载荷的增大而增大。**结论** SPF Mo 的添加可有效提高润滑油的摩擦学性能, 研究结果可为新型发动机低黏度润滑添加剂的设计和选择提供参考。

关键词: 非硫磷有机钼; 减摩抗磨; 自修复; 低黏度润滑油添加剂; 添加量; 使用温度

中图分类号: TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)09-0035-10

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.09.003

Tribological Properties of Non-thiophosphorous Organic Molybdenum

DAI Yuan-jing^{1,2}, LI Xiao-lei^{1,2}, LING Yan-li¹, ZOU Yang¹, ZHANG Ji-ping¹, ZHANG Chen-hui^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2.Research Institute of Lubrication, Tianjin Research Institute for Advanced Equipment, Tsinghua University, Tianjin 300300, China)

ABSTRACT: The aims to research tribological properties of non-thiophosphorous organic molybdenum, in order to meet the demand of the development of low viscosity lubricating oil of engine, a new kind of sulfur- and phosphorus-free organic molybdenum (SPF Mo) was synthesized and added into the lubricating oil 0W20. Moreover, the influence of SPF Mo content, temperature, load and rotation speed on the tribological performance of 0W20 was studied in detail. The results show that the SPF Mo shows good anti-friction and anti-wear performances, both the COF and wear diameter of 0W20 can be decreased. During the friction process, the Mo is enriched and has the function of lubrication, anti-wear and self-repairing. MoS₂ and MoO₃ are generated by tribochemical reaction, which is the main part of the lubricating film. The SPF Mo content and temperature in

收稿日期: 2020-06-29; 修订日期: 2020-08-05

Received: 2020-06-29; Revised: 2020-08-05

作者简介: 戴媛静 (1977—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为润滑介质的开发及应用。邮箱: daiyj@tsinghua-tj.org

Biography: DAI Yuan-jin (1977—), Female, Master, Senior engineer, Research focus: development and application of lubricants. E-mail: daiyj@tsinghua-tj.org

引文格式: 戴媛静, 李小磊, 凌燕丽, 等. 非硫磷有机钼的摩擦学性能研究[J]. 表面技术, 2020, 49(9): 35-44.

DAI Yuan-jing, LI Xiao-lei, LING Yan-li, et al. Tribological properties of non-thiophosphorous organic molybdenum[J]. Surface technology, 2020, 49(9): 35-44.

which the SPFMo can show great tribological performance is 0.25wt%~0.5wt% and 100~130 °C, respectively. When the temperature is 120 °C, the COF and wear diameter can be decreased by 27.5% and 7.8% by the addition of 0.5% SPFMo. The COF of 0W20+0.5%SPFMo decreases firstly and then increases with the increase of temperature, decreases with the increase of rotation speed and friction load. The wear diameter of 0W20+0.5%SPFMo decreases firstly and then increases with the increase of temperature, increases with the increase of rotation speed and friction load. Finally, the results can be helpful for designing and selecting new additives of engine oil with high low viscosity.

KEY WORDS: SPFMo; anti-friction and anti-wear; self-repairing; low viscosity lubricant additive; SPFMo content; operating temperature

随着世界能源形势和环境污染问题的日益严峻,各国开始不断收紧汽车燃油消耗及排放标准,这对现有内燃机提出了更高的要求。内燃机想要继续保持其旺盛的生命力,就必须在节能减排技术上有所突破。内燃机中大多数摩擦副处于流体润滑状态^[1-2],根据 Stribeck 曲线可知,通过降低润滑油的黏度可以减小流体润滑阶段的摩擦系数,从而实现内燃机的节能减排。但润滑油黏度降低之后,会导致摩擦副从流体润滑状态向边界/混合润滑状态转化,使得摩擦力增大、磨损增加,此时需要润滑油添加剂的配合以减小边界/混合润滑状态下的摩擦和磨损。因此,减摩抗磨润滑添加剂成为了近几年国内外内燃机领域研究的热点^[3-6]。MoS₂是一种固体润滑剂,作为第一代含钼润滑油添加剂,其类似石墨的层状结构和层间微弱的范德华力使其具有优异的减摩性能^[7-8]。但二硫化钼跟其他纳米添加剂一样,如金属铜、纳米氮化硼、石墨烯等^[9-11],在润滑油中分散困难,容易产生沉淀。为了解决含钼添加剂的油溶性问题,研究者们先后开发了二烷基二硫代磷酸钼(MoDDP)和二烷基二硫代氨基甲酸钼(MoDTC),这些添加剂能够均匀地溶于油中,解决了在润滑油中的分散问题,成为了理想的润滑油添加剂^[12-13]。MoDDP 和 MoDTC 能够在保持减摩抗磨性能的同时还具有抗氧化作用和一定的防腐能力,但其分子中仍包含硫、磷元素,存在一定的环保问题。

新型有机钼添加剂正向无硫磷的方向发展,主要包括有机钼酸盐、钼酸脂及其他钼的配位化合物^[14-15]等。例如,装甲兵工程学院井致远等^[16]将不同添加量的非硫磷有机钼添加剂加入柴油机油中,利用 SRV 摩擦磨损试验机考察发现有机钼能够表现出良好的减摩性能,且其减摩性能随有机钼添加量的增大而提高。后勤工程学院夏迪等^[17]考察了自制有机钼添加剂在润滑油(20W-50)中的摩擦学性能,发现有机钼比常用添加剂(T202 和 NA451)显现出更好的减摩抗磨效果。上海交通大学龚民等^[18]采用二羟乙基十八胺与钼酸铵作为原材料,合成了非硫磷有机钼添加剂(HOAM),并以锂基脂作为润滑材料,用四球摩擦磨损试验机考察了HOAM 和 Molyvan855 两种添加剂的减摩抗磨性能,得出 HOAM 和 Molyvan855 两种添

加剂均有非常好的减摩抗磨性能,抗磨损能力随着添加剂质量分数的增加而增强。笔者课题组前期^[19]也合成了非硫磷有机钼添加剂(SPFM),同时研究了 SPFM 与 ZDDP 在基础油 PAO8 中的协同减摩抗磨效果和机理。现有研究大多是局限于考察有机钼在高黏度成品润滑油或者纯基础油中的减摩抗磨效果,一般考虑与 ZDDP 的协同作用,且试验条件比较单一。而在实际运用中,有机钼通常添加到含有多种添加剂的全配方油中,并且常处于高温、重载等多工况耦合的条件。

本文通过一步法常压反应制备了一种合成工艺更加简单的非硫磷有机钼添加剂,重点考察了其在低黏度 0W-20 成品油中的摩擦学性能,分析了有机钼添加量、载荷、温度、转速等对有机钼减摩抗磨效果的影响,研究结果可为发动机润滑油低黏化发展提供有力的技术支撑和理论参考。

1 试验材料与方法

1.1 有机钼制备及添加

有机钼添加剂为实验室合成,利用植物油、钼酸铵等通过一步法合成非硫磷有机钼(Sulfur- and phosphorus-free organo-molybdenum, SPFMo),制得钼质量分数在 5.0%左右的非硫磷油溶性有机钼添加剂。然后将合成得到的有机钼添加剂添加到某品牌发动机润滑油 SN 0W-20 中,其添加量分别为 0.05%、0.1%、0.15%、0.2%、0.25%、0.35%、0.5%和 1%,在 65 °C 下均匀搅拌 30 min,降温至室温后待用。为表述方便,按照 SPFMo 的添加量对润滑油进行命名,如润滑油 0W20+0.5%SPFMo 代表在 0W20 润滑油中添加了 0.5%的非硫磷有机钼。

采用热重分析仪(TGA/DSC)来表征有机钼添加剂的热稳定性,在氮气气氛中从室温升温至 800 °C,升温速率为 20 °C/min;采用电感耦合等离子光谱仪(ICP)对 SPFMo 及 0W20 的元素含量进行测量。

1.2 摩擦学性能测试

利用四球摩擦磨损试验机(MS-10A 型,厦门天机自动化有限公司)对含有机钼润滑油的摩擦学性能

进行测试, 其测试系统示意图如图 1 所示。试验所用钢球为 GCr15 标准钢球, 硬度为 59~61HRC, 直径为 12.7 mm。试验条件: 转速分别为 500、1000、1500、2000、2500 r/min, 载荷分别为 100、200、400、800、1200 N, 试验温度分别为 60、100、110、120、130、140、180 °C, 试验时间为 30 min。

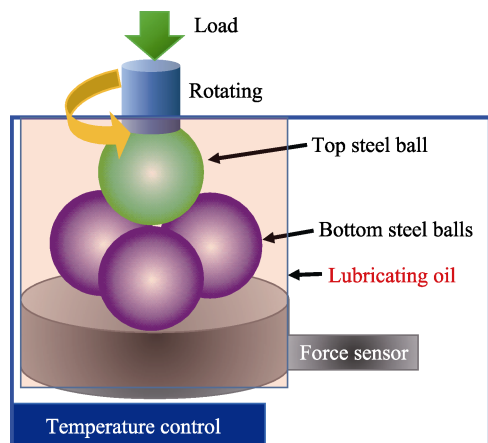


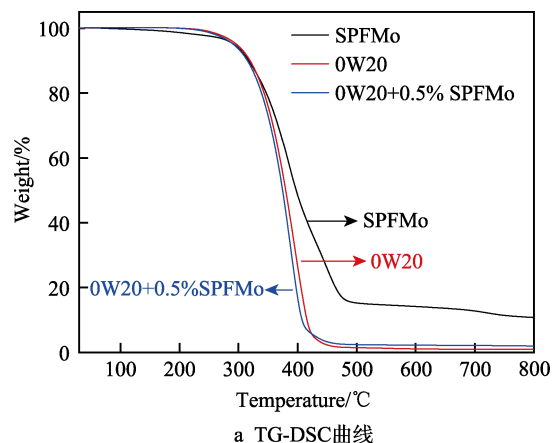
图 1 摩擦测试系统示意图
Fig.1 Schematic diagram of friction test

借助四球摩擦磨损试验机配备的显微镜对钢球表面的磨斑进行观测和测量, 测试 3 个下试球的磨斑直径, 取其平均磨斑直径。利用无水乙醇对钢球进行超声清洗, 分别采用 3D 激光共聚焦显微镜 (OLS4000, OLYMPUS) 和场发射扫描电子显微镜 (SEM, Sigma 300, ZEISS) 对磨痕形貌和成分进行分析。

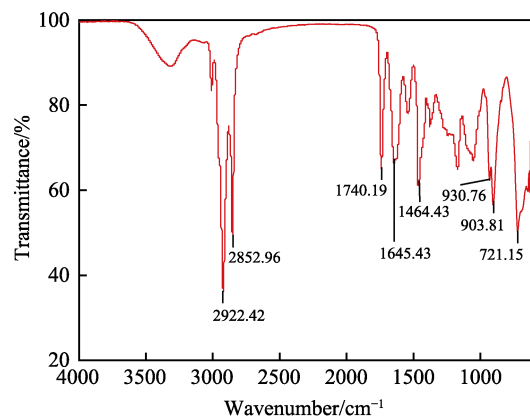
2 结果与讨论

2.1 非硫磷有机钼表征

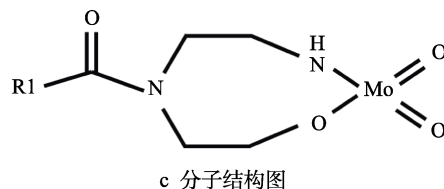
0W-20 和非硫磷有机钼的 TG-DSC 曲线如图 2a 所示, 可以看出基础油和添加剂的分解温度均超过 250 °C, 具有较高的热稳定性。发动机润滑油的工作温度一般不超过 200 °C^[20-21], ZDDP 的热分解温度一般为 130~185 °C。图 2b 为合成的非硫磷有机钼的 FTIR 谱图, 其中 2922 cm⁻¹ 和 2852 cm⁻¹ 为 C—H 的伸缩振动吸收峰, 1740 cm⁻¹ 为 C=O 的伸缩振动吸收峰, 930 cm⁻¹ 为 Mo=O 的伸缩振动吸收峰。Mo=O 的伸缩振动吸收峰在反应后移动到了 930 cm⁻¹ 处, 说明 Mo 原子与—OH 和—NH₂ 结合, O 原子和 N 原子上部分电荷转移到 Mo 原子上, 从而减弱了 Mo=O 的伸缩振动, 使原本应该在 995 cm⁻¹ 处的峰右移到 930 cm⁻¹ 处^[19]。结合红外测试结果及反应过程, 推测出 SPF Mo 的分子结构应如图 2c 所示。另外, 利用 ICP 分析得到 SPF Mo 中钼元素的质量分数为 5.04%, 0W20 中 S 元素的质量分数为 0.32%, 其中 0W20 中的 S 元素会成为摩擦区形成摩擦化学反应膜中 S 元素的来源。



a TG-DSC 曲线



b FTIR 谱图



c 分子结构图

图 2 非硫磷有机钼表征

Fig.2 Characterization of SPF Mo: (a) TG-DSC, (b) FTIR, (c) proposed structure model

2.2 摩擦学性能测试

不同添加量、温度、载荷和转速条件下, 润滑油的摩擦系数变化曲线如图 3 所示。图 3a 为摩擦系数随 SPF Mo 添加量的变化情况, 试验条件为: 载荷 200 N, 温度 120 °C, 转速 1500 r/min, 时间 30 min。可以看出, 随着 SPF Mo 含量的增加, 摩擦系数 (COF) 先减小后趋于稳定。其中, 0W20 的 COF 值为 0.091, 当添加剂的质量分数增大到 0.25% 时, COF 达到最小值 (0.064), COF 降低了 29.7%。继续增加 SPF Mo 的添加量, COF 值基本维持稳定, 处于 0.064~0.067 之间。

转速为 1500 r/min、载荷为 200 N 时, 不同试验温度下润滑油的 COF 值如图 3b 所示。0W20 的 COF 随着试验温度的升高而升高, 随着温度的升高, 润滑油的黏度降低, 润滑膜的承载能力减弱, 固固接触增多, 从而使 COF 增大。添加 0.5% 的 SPF Mo 后, 0W20

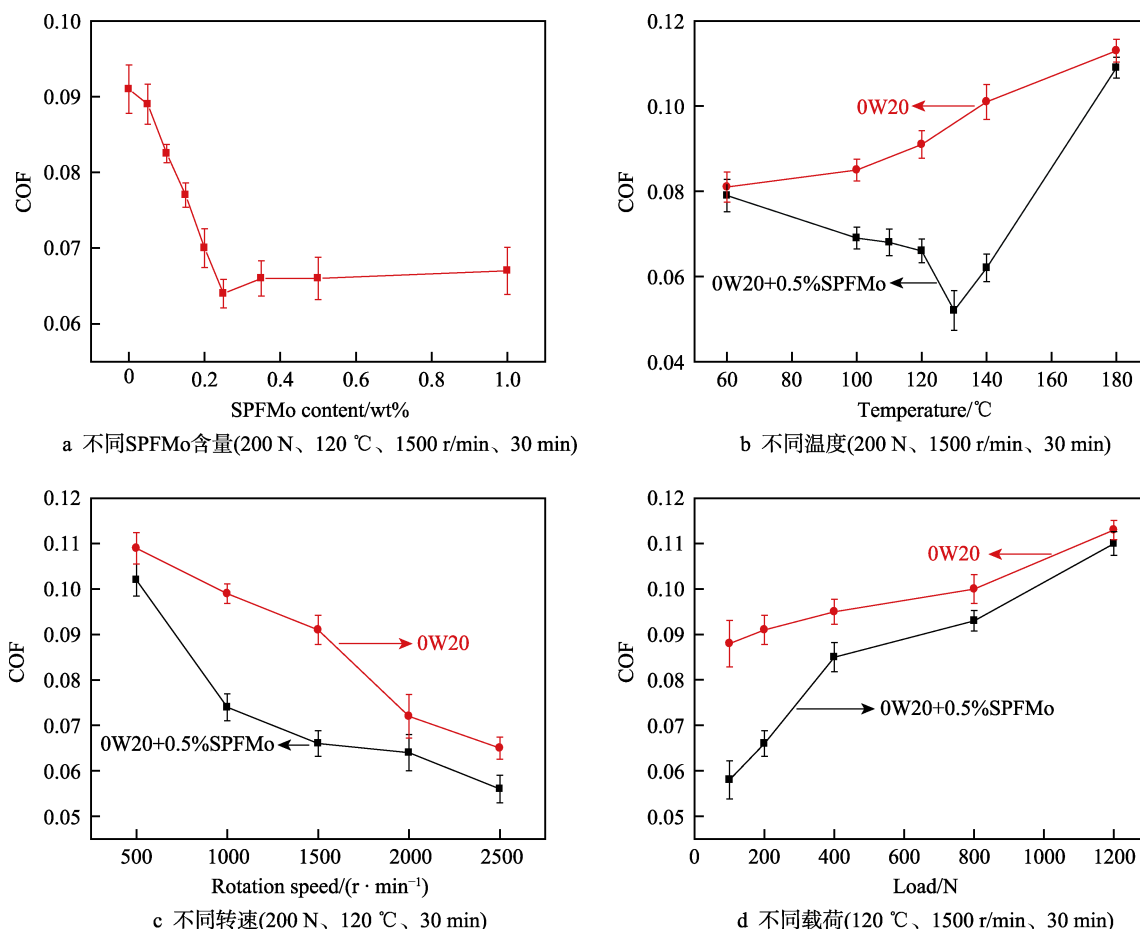


图3 不同条件下润滑油的COF值

Fig.3 COF of lubricants under different conditions: (a) SPFMo contents (200 N、120 °C、1500 r/min、30 min), (b) temperature (200 N、1500 r/min、30 min), (c) speed (200 N、120 °C、30 min), (d) load (120 °C、1500 r/min、30 min)

的COF随温度的升高先减小后增大,温度为60 °C时,0.5%SPFMo的减摩效果并不明显,仅使0W20的COF降低了2.5%,这是因为温度对有机钼的减摩作用存在诱导期,在温度较低的情况下,减摩效果不明显^[22]。在130 °C时COF达到最低值(0.052),此时在100~140 °C温度区间内,虽然润滑油的黏度也降低,但添加剂SPFMo使润滑油在摩擦时能够生成更多的MoS₂润滑膜,从而使得COF降低^[23-24]。

图2c为温度120 °C、载荷200 N时,COF大小随转速的变化情况。0W20和0W20+0.5%SPFMo的COF均随着转速的升高而减小。随着转速的增大,更多的润滑油分子被带入摩擦接触区,改善了润滑条件,因此摩擦系数更小^[25]。图2d为120 °C、1500 r/min条件下0W20和0W20+0.5%SPFMo润滑油的摩擦系数随载荷的变化曲线,可见随着载荷的增大,COF增大。载荷越大,上下钢球发生固固接触的可能性增大,因此COF增大。

总体而言,SPFMo的加入可以有效降低不同工况下0W20润滑油的摩擦系数,具有优良的减摩效果。

图4为不同添加量、温度、载荷和转速条件下进行四球摩擦实验后下球磨斑的平均直径大小。由图

4a可知,随着SPFMo添加量的增大,磨斑直径先减小后增大。当润滑油中添加的SPFMo量不超过0.5%时,下球的磨损均比用0W20润滑油润滑时的磨损小,说明SPFMo在一定添加范围内具有一定的抗磨效果。但是,当SPFMo的添加量为1%时,磨斑的直径甚至大于未加SPFMo的0W20。图5为利用不同SPFMo含量进行四球试验后下球磨斑的对比图,从图中可明显看出,当SPFMo添加量为0.5%时(图5b),磨痕表面较为光滑,但当添加量增大到1.0%后,磨斑表面又变得粗糙,从元素成分上(图5d)推测其表面生成了黑色的含C、O、Fe、Mo等主要成分的堆积物。

图4b为1500 r/min、200 N及不同试验温度下,分别对0W20和0W20+0.5%SPFMo两种润滑油进行四球测试后下球的磨斑直径大小。随着温度的升高,0W20磨斑直径的整体变化趋势增大。但添加SPFMo后,磨斑直径变化曲线在100~140 °C之间有个低谷,说明SPFMo会在这个温度区间内发挥出较为优异的抗磨性能。图6和表1为对应的磨斑图片及不同点的元素分布情况,磨痕均呈条纹状,局部有点蚀。从6a—f可以看出,随着温度的升高,磨斑表面先变光

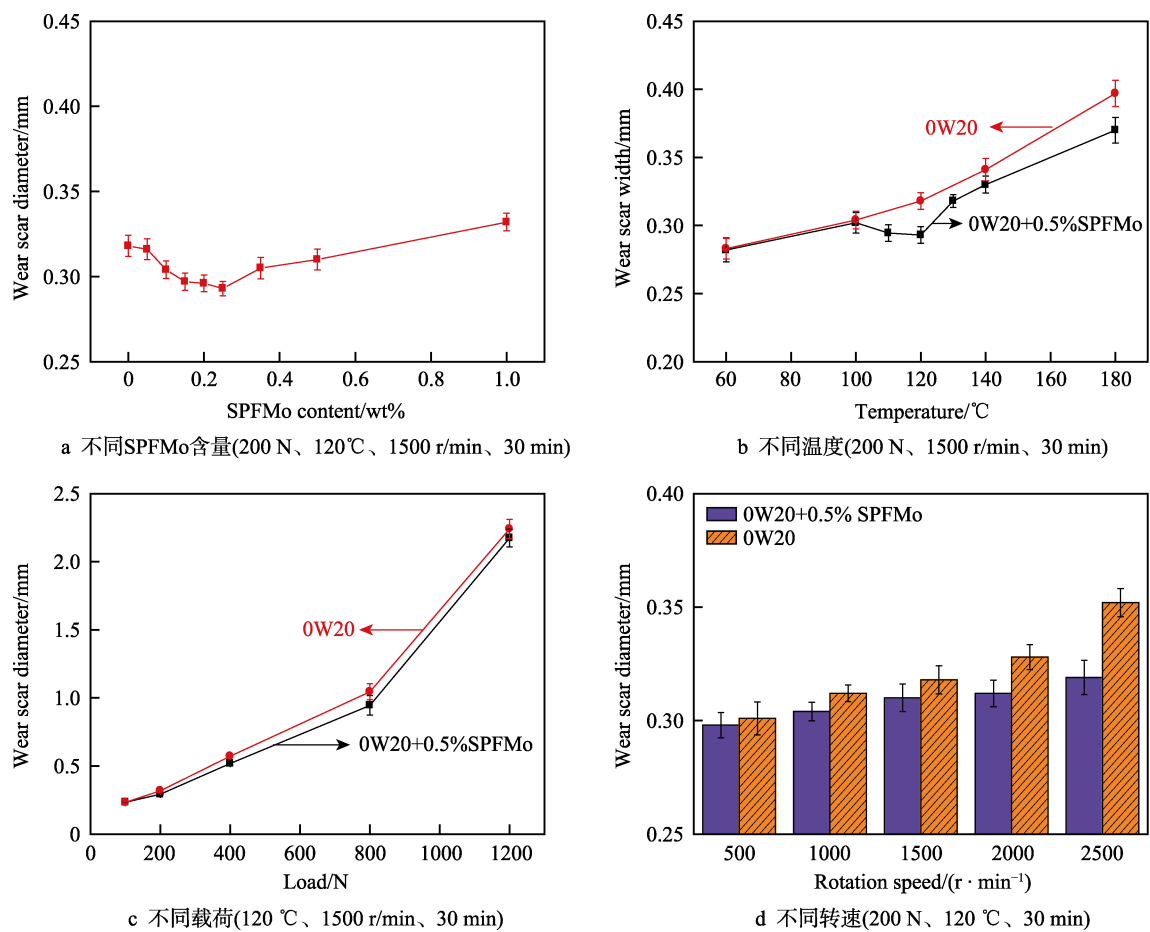


图 4 不同条件下摩擦测试后下球磨斑的平均直径

Fig.4 The average diameter of wear scar on steel balls tested under different conditions: (a) SPFMo contents (200 N、120 °C、1500 r/min、30 min), (b) temperature (200 N、1500 r/min、30 min), (c) speed (200 N、120 °C、30 min), (d) load (120 °C、1500 r/min、30 min)

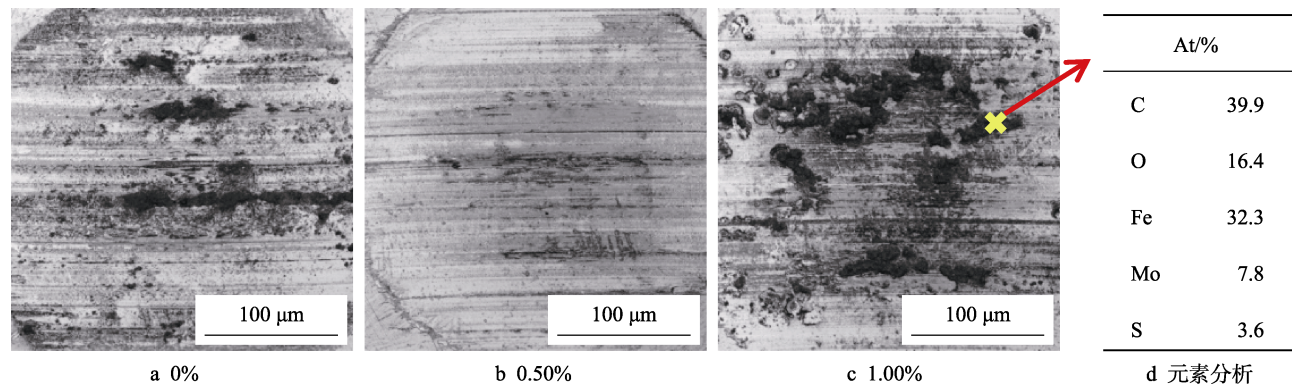


图 5 不同 SPFMo 添加量对应的钢球表面磨斑

Fig.5 The wear scars of steel balls tested with different SPFMo contents: (a) 0%, (b) 0.50%, (c) 1.00%, (d) element analysis

滑后变粗糙,当温度为 100 °C 和 120 °C 时,表面较为平整,有少量轻微的犁沟状磨痕。另外,从点 5、点 6 和点 7 的元素成分中均发现了明显的 Mo 元素和 S 元素,说明 SPFMo 中的 Mo 在摩擦区不断富集,同时生成了新的 Mo 化合物。从图 6e 的磨斑形貌及点 7 的成分可以看出,高温 (180 °C) 时,磨痕表面变得粗糙,出现了较多的犁沟状磨痕,同时表面的 Mo 元素含量有所减少,C 元素大量增多,说明高温下伴随

着基础油的碳化过程,有机钼的减摩抗磨效果会降低。图 6h 为高温下 0W20 对应的磨斑,可以发现表面生成了大量的 Fe、C、O 的化合物。

由图 4c 和图 7 可以看出,磨斑直径随着载荷的增大而增大,载荷越大,上下钢球发生固固接触的可能性增大,因此磨损增大。SPFMo 的添加,可使磨斑变小、磨痕变平整,说明有机钼除了具有减摩抗磨作用外,还具有一定的磨痕修复作用^[26],其产物会对

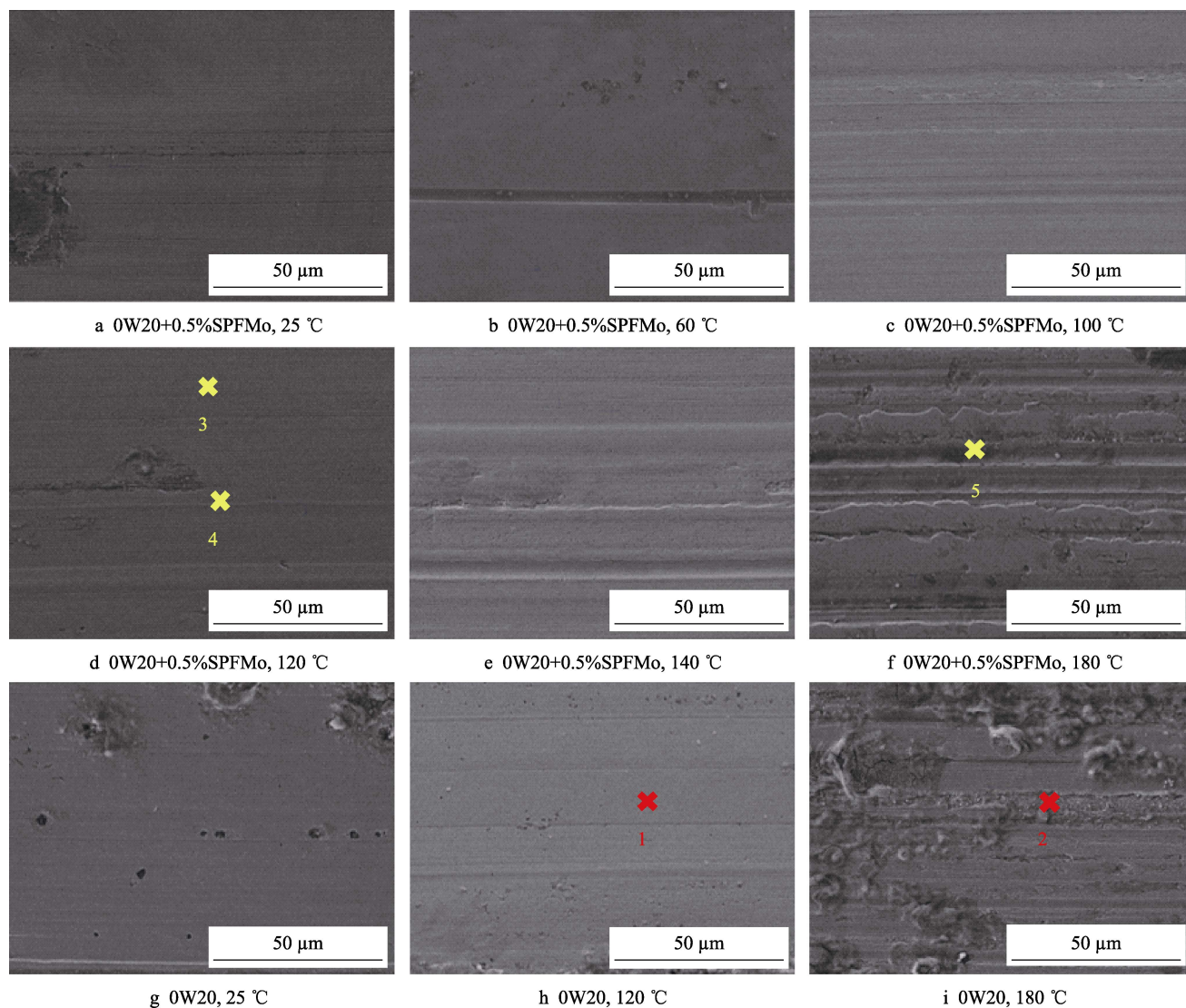


图 6 不同试验温度下 0W20+0.5%SPF Mo 和 0W20 润滑油对应的磨斑 SEM 图及元素分布

Fig.6 SEM images of wear scars tested with 0W20+0.5%SPF Mo and different temperatures: (a) 25 °C, (b) 60 °C, (c) 100 °C, (d) 120 °C, (e) 140 °C, (f) 180 °C; SEM images of wear scars tested with 0W20: (g) 25 °C, (h) 120 °C, (i) 180 °C

表 1 图 6 中不同点的元素分布
Tab.1 Element distributions of different points

Point	C	O	Fe	Cr	Mo	S
1	35.7	5.3	57.9	1.1	—	—
2	16.4	48.2	34.4	1.0	—	—
3	27.1	7.6	58.5	—	4.5	2.3
4	26.0	5.2	56.9	—	6.7	5.2
5	59.9	8.2	23.1	—	2.2	6.6

摩擦区的凹坑进行填充。

图 4d 为不同转速下, 0W20、0W20+0.5%SPF Mo 两种润滑油进行四球测试后的磨斑直径对比图。SPF Mo 在不同转速下均具有抗磨效果, 且随着转速的增大, 其抗磨效果越好。在转速为 2500 r/min 时, 0W20 中添加 0.5%SPF Mo 可使其磨斑直径减小 9.4%。

2.3 减摩抗磨机理

有机钼添加剂能够起到减摩抗磨的效果, 是一个物理、化学反应共同作用的过程。摩擦过程中有机钼本身或其分解产物在表面聚集、吸附、反应, 生成了润滑膜, 起到润滑和保护的作用, 也就是分解成膜机制^[27]。有机钼的减摩抗磨作用主要是因为能够在摩擦过程中形成 MoS_2 、 MoO_3 等组成的摩擦化学反应膜^[28], 笔者课题组在前期工作中也通过高分辨透射电镜 (HRTEM), 在摩擦副接触区直接观测到摩擦化学反应膜中存在 MoS_2 。

图 8 和图 9 分别为不同 SPF Mo 添加量和试验温度条件下进行四球试验后下球磨斑不同元素的 EDS 面扫结果图。随着 SPF Mo 添加量的增大, 磨痕表面的 Mo 元素增多 (图 8), 同时 S 元素的分布与 Mo 元素形成良好的匹配, 这意味着摩擦区域生成了 MoS_2 ,

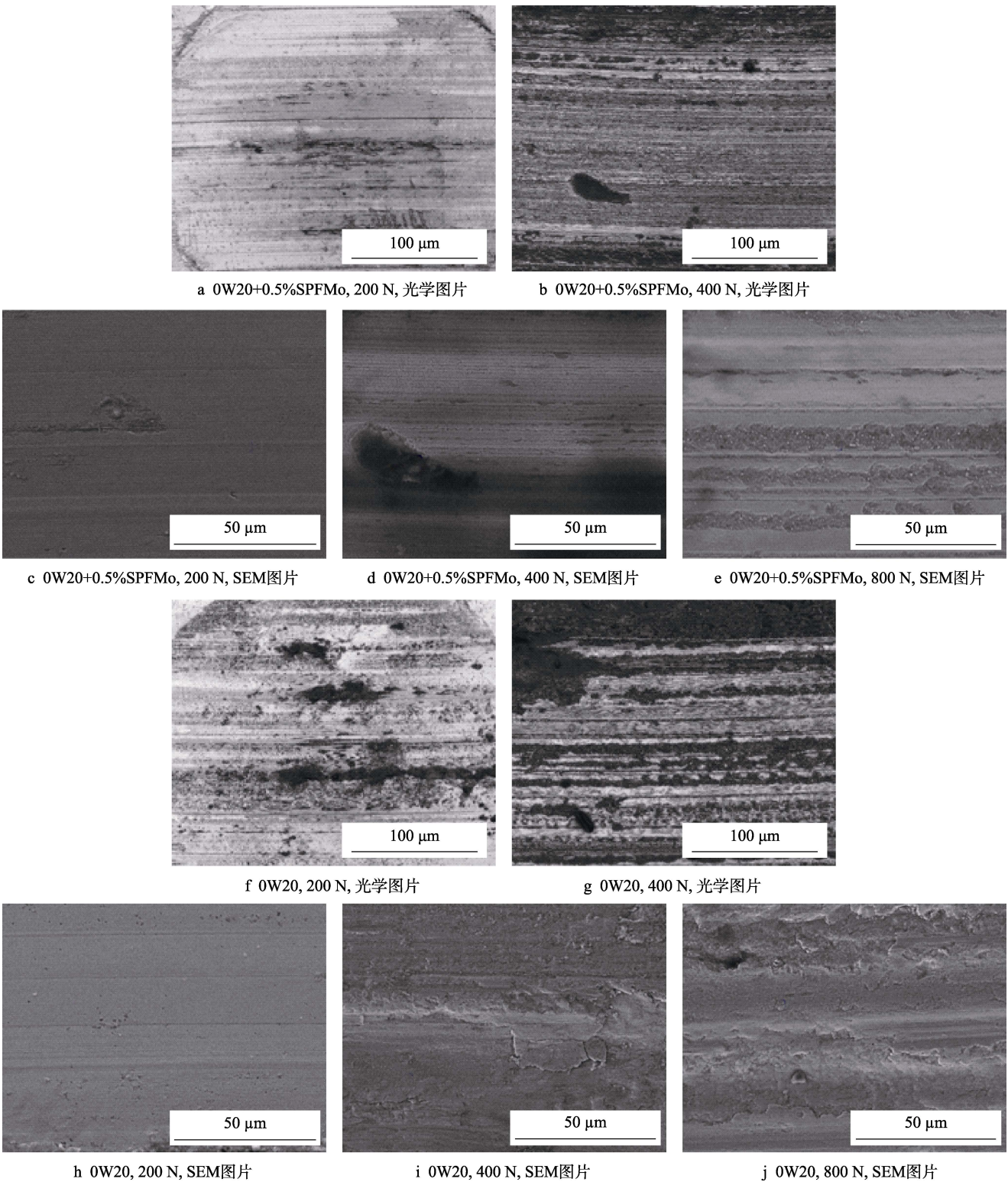


图 7 不同载荷下 0W20+0.5%SPFMo 和 0W20 润滑油对应的磨斑光学图片和 SEM 图片
Fig.7 Optical images of wear scars tested with 0W20+0.5%SPFMo and different loads: (a) 200 N, (b) 400 N, and their SEM images: (c) 200 N, (d) 400 N, (e) 800 N. Optical images of wear scars tested with 0W20 and different loads: (f) 200 N, (g) 400 N, and their SEM images: (h) 200 N, (i) 400 N, (j) 800 N.

S 元素主要来源于 0W20 中的含硫添加剂。但当 SPFMo 的添加量由 0.5%增大至 1%时,磨痕表面的 Mo 元素分布略微变少且不均匀,不均匀的润滑膜会导致润滑油的抗磨效果变差,这也说明了 SPFMo 添

加量过高会导致磨斑变大的原因。结合图 3a 和 4a 的研究结果可以发现,SPFMo 的添加量并不是越多越好,除了经济性问题外,可能还会造成抗磨性能的减弱,这与文献[29]的研究结果一致。因此,本研究中

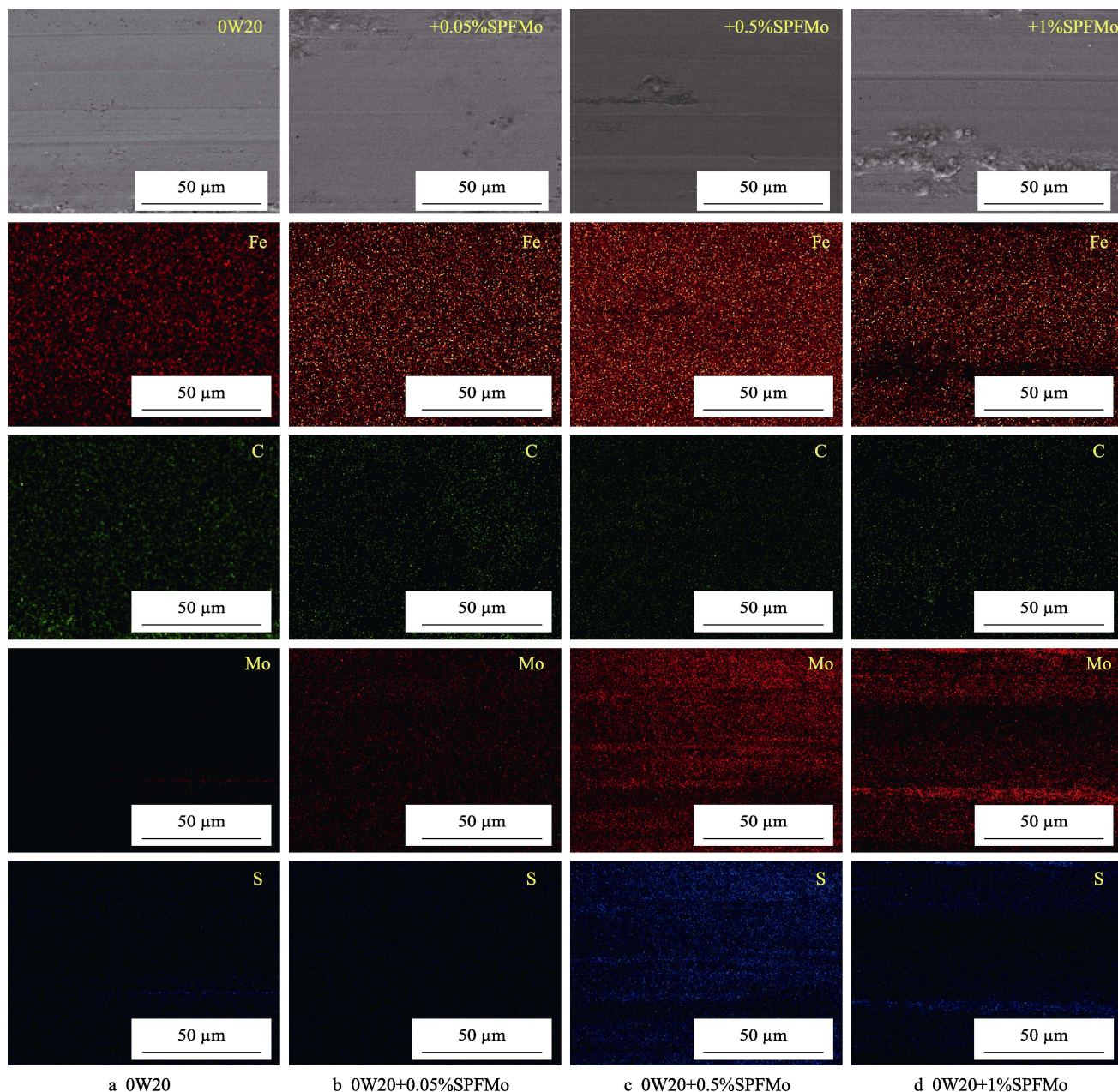


图8 添加不同含量 SPF Mo 润滑油对应的磨斑区域元素分布图

Fig.8 The distribution diagrams of different elements in wear scars tested with different lubricating oils

SPF Mo 在 0W20 润滑油中的添加量应控制在 0.25%~0.5%之间。

随着温度的升高,磨痕区域的 Mo 元素先增多后减少(图 9)。60℃和 180℃时,SPF Mo 均不能在摩擦区域形成良好的润滑膜,所以其减摩抗磨效果一般。结合温度对 0W20+0.5%SPF Mo 润滑油摩擦系数(图 3b)和下球磨斑(图 4b)的影响可以推测出,SPF Mo 具有良好摩擦学性能的温度区间为 100~130℃。当然,也有试验表明,有机钼在不同种类的润滑油中发挥减摩抗磨作用的最佳温度不同^[30]。

另外,从图 8 中 1%SPF Mo 和图 9 中 180℃的形貌图和 Mo 元素分布图可以看出,Mo 元素含量在磨痕区域的凹坑处较高,说明生成的 MoS₂、MoO₃ 等物

质对磨痕有一定的修复作用,验证了图 7 中提到的 SPF Mo 具有修复磨损的效果。

3 结论

1) 通过一步法合成制备的新型非硫磷油溶性有机钼 SPF Mo,可用于改善 0W20 润滑油的摩擦学性能。摩擦过程中 Mo 元素会发生富集,生成包含 MoS₂、MoO₃ 等物质的摩擦化学反应膜,从而实现减摩、抗磨和自修复。

2) 随着 SPF Mo 添加量的增多,0W20 润滑油的 COF 先减小后稳定,磨斑直径先减小后增大,磨痕先变平整后变粗糙,SPF Mo 在 0W20 中的最佳添加范围为 0.25%~0.5%。

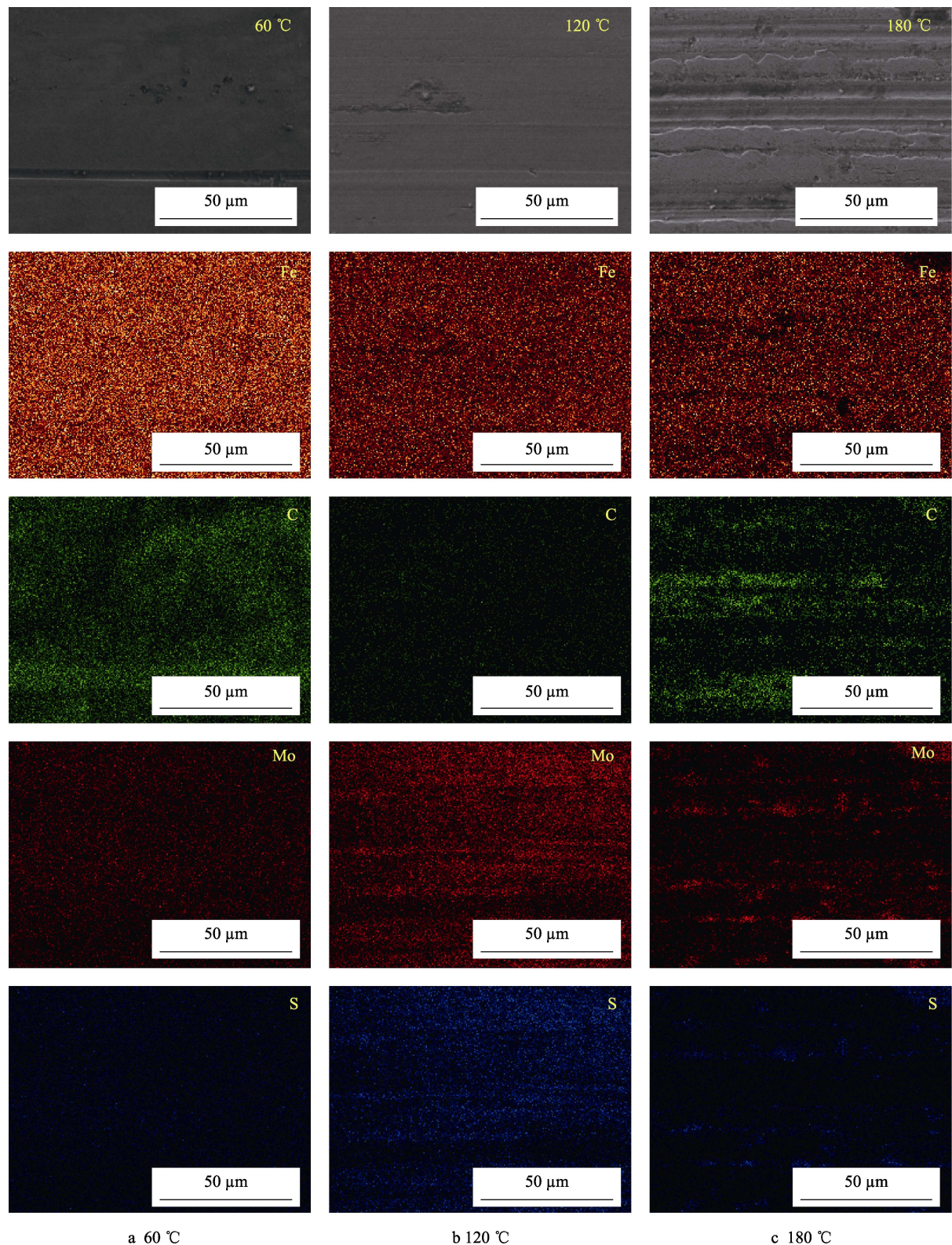


图 9 不同温度下 0W20+0.5%SPFMo 对应的磨斑区域元素分布图
Fig.9 The distribution diagrams of different elements in wear scars tested with 0W20+0.5%SPFMo and different temperatures

3) 随着试验温度的升高, 0.5%SPFMo 的减摩和抗磨效果先增强后降低, 其发挥最佳摩擦学性能的温度区间为 100~130 °C。120 °C 时, 0.5%SPFMo 能够使 0W20 润滑油的 COF 降低 27.5%, 磨斑直径降低 7.8%。

4) 0W20+0.5%SPFMo 润滑油的 COF, 随着温度的升高先减小后增大, 随着转速的增大而减小, 随着载荷的增大而增大; 0W20+0.5%SPFMo 润滑油的磨斑直径, 随着温度的升高先减小后增大, 随着转速和载荷的增大而增大。

参考文献:

- [1] TAYLOR R I, DE KRAKER B R. Shear rates in engines and implications for lubricant design[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part J: Journal of engineering tribology, 2017, 231(9): 1106-1116.
- [2] TAYLOR R I, MORGAN N, MAINWARING R, et al. How much mixed/boundary friction is there in an engine and where is it?[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part J: Journal of engineering tribology, 2019, 233(1): 1-17.
- [3] 王陈向, 闫嘉昕, 范利锋, 等. 改性纳米坡缕石在润滑油中的减摩抗磨性能研究[J]. 表面技术, 2019, 48(12): 218-225.
WANG Chen-xiang, YAN Jia-xin, FAN Li-feng, et al. Anti-friction and anti-wear performance of modified nanopalygorskite in oil[J]. Surface technology, 2019, 48(12): 218-225.
- [4] 梅堂杰, 郭俊德, 李月, 等. 片状纳米 MoS₂ 的制备及其在润滑油中的减摩抗磨性能研究[J]. 表面技术, 2018, 47(8): 129-138.
MEI Tang-jie, GUO Jun-de, LI Yue, et al. Preparation of flaky nano-MoS₂ and its anti-friction and anti-wear performance in oil[J]. Surface technology, 2018, 47(8): 129-138.
- [5] SGROI M, GILI F, MANGHERINI D, et al. Friction reduction benefits in valve-train system using IF-MoS₂ added engine oil[J]. Tribology transactions, 2015, 58(2): 207-214.
- [6] 贾陆营, 连勇, 张津, 等. 羟基硅酸镁粉体表面改性及作为润滑油添加剂的摩擦学性能研究[J]. 表面技术, 2020, 49(4): 213-221.
JIA Lu-ying, LIAN Yong, ZHANG Jin, et al. Surface modification and tribological properties of magnesium silicate hydroxide powder as lubricant additive[J]. Surface technology, 2020, 49(4): 213-221.
- [7] 霍英杰, 侯锁霞, 张好强, 等. 纳米二硫化钼的水热法可控制备及极压性能研究[J]. 润滑与密封, 2017(9): 107-110.
HUO Ying-jie, HOU Suo-xia, ZHANG Hao-qiang, et al. Controllable hydrothermal method preparation of nano molybdenum disulfide and its extreme pressure property[J]. Lubrication engineering, 2017(9): 107-110.
- [8] 沃恒洲, 胡坤宏, 胡献国. 纳米二硫化钼作为机械油添加剂的摩擦学特性研究[J]. 摩擦学学报, 2004, 24(1): 33-37.
WO Heng-zhou, HU Kun-hong, HU Xian-guo. Tribological properties of MoS₂ nanoparticles as additive in a machine oil[J]. Tribology, 2004, 24(1): 33-37.
- [9] ABDULLAH M I H C, ABDOLLAH M F B, AMIRUDDIN H, et al. Effect of hexagonal boron nitride nanoparticles as an additive on the extreme pressure properties of engine oil[J]. Industrial lubrication and tribology, 2016, 68(4): 441-445.
- [10] ESWARAIH V, SANKARANARAYANAN V, RAMAPRABHU S. Graphene-based engine oil nanofluids for tribological applications[J]. ACS applied materials & interfaces, 2011, 3(11): 4221-4227.
- [11] SGROI M, GILI F, MANGHERINI D, et al. Friction reduction benefits in valve-train system using IF-MoS₂ added engine oil[J]. Tribology transactions, 2015, 58(2): 207-214.
- [12] ESPEJO C, WANG C, THIÉBAUT B, et al. The role of MoDTC tribochemistry in engine tribology performance[J]. Tribology international, 2020, 150: 106366.
- [13] JU Shu, KATHRYN Harris, BULAT Munavirova, et al. Tribology of polypropylene and Li-complex greases with ZDDP and MoDTC additives[J]. Tribology international, 2018, 118: 189-195.
- [14] 郭志光, 刘维民. 新型无硫、磷有机钼化合物润滑油添加剂对钢/钢摩擦副摩擦磨损性能影响研究[J]. 摩擦学学报, 2006, 26(2): 97-101.
GUO Zhi-guang, LIU Wei-min. Tribological behavior of molybdenum coordination compound without sulfur and phosphorus as oil additive for steel-steel contact[J]. Tribology, 2006, 26(2): 97-101.
- [15] WU H, WANG L, DONG G, et al. Lubrication effectiveness investigation on the friendly capped MoS₂ nanoparticles[J]. Lubrication science, 2017, 29(2): 115-129.
- [16] 井致远, 许一, 张伟, 等. 无硫磷有机钼对不同基体材料的润滑效果研究[J]. 石油炼制与化工, 2016, 47(12): 80-86.
JING Zhi-yuan, XU Yi, ZHANG Wei, et al. Lubricating effect of sulfur-and phosphorus-free organic molybdenum on different matrix materials[J]. Petroleum processing and petrochemicals, 2016, 47(12): 80-86.
- [17] 夏迪, 陈国需, 程鹏, 等. 二烷基二硫代氨基甲酸钼作为润滑油添加剂的性能研究[J]. 石油学报(石油加工), 2016, 32(1): 125-131.
XIA Di, CHEN Guo-xu, CHENG Peng, et al. Performance research of molybdenum dialky dithiocarbamate as additive in lubricant[J]. Acta petrolei sinica (petroleum processing section), 2016, 32(1): 125-131.
- [18] 龚民, 张刚强, 任天辉, 等. 非硫磷有机钼添加剂的制备及其摩擦学性能研究[J]. 润滑与密封, 2017, 42(4): 29-35.
GONG Min, ZHANG Gang-qiang, REN Tian-hui, et al. Preparation and tribological behavior study of sulfur and phosphorus free organic molybdenum additives[J]. Lubrication engineering, 2017, 42(4): 29-35.
- [19] HUAI W, CHEN X, LU F, et al. Tribological properties of sulfur- and phosphorus-free organic molybdenum compound as additive in oil[J]. Tribology international, 2020, 141: 105944.
- [20] KOYAMA R, CHEN L, ALAVI S, et al. Improving thermal efficiency of hydrate-based heat engine generating renewable energy from low-grade heat sources using a crystal engineering approach[J]. Energy, 2020, 198: 117403.
- [21] NADA F J, ALDEN M, RICHTER M, et al. Investigation of the effect of engine lubricant oil on remote temperature sensing using thermographic phosphors[J]. Journal of luminescence, 2016, 179: 568-573.

(下转第 71 页)

- 60-67.
- [16] WU Hong-xing, QIN Li-guo, DONG Guang-neng, et al. An investigation on the lubrication mechanism of MoS₂ nano sheet in point contact: The manner of particle entering the contact area[J]. Tribology international, 2017, 107: 48-55.
- [17] 张建强, 冯辉霞, 赵霞, 等. KH570 对二硫化钼粉体表面的改性研究[J]. 化学试剂, 2009(1): 5-8.
ZHANG Jiang-qiang, FENG Hui-xia, ZHAO Xia, et al. Study on the surface modification of MoS₂ powder with KH570[J]. Chemical reagent, 2009(1): 5-8.
- [18] CHEN M, FENG Y G, WANG X, et al. Silver nanoparticles capped by oleylamine: Formation, growth, and self-organization[J]. Langmuir, 2007, 23(10): 5296-5304.
- [19] TREADWELL L J, BOYLE T J, BELL N S, et al. Impact of oleylamine: Oleic acid ratio on the morphology of yttria nanomaterials[J]. Journal of materials science, 2017, 52(13): 8268-8279.
- [20] PAN Yi, BAI Han-ying, PAN Liang, et al. Size controlled synthesis of monodisperse PbTe quantum dots: Using oleylamine as the capping ligand[J]. Journal of materials chemistry, 2012, 22(44): 23593-23601.
- [21] ALTAVILLA C, SARNO M, CIAMBELLI P. A novel wet chemistry approach for the synthesis of hybrid 2D free-floating single or multilayer nanosheets of MS₂@oleylamine (M=Mo, W)[J]. Chemistry of materials, 2011, 23(17): 3879-3885.
- [22] MA Chong-bo, QI Xiao-ying, CHEN Bo, et al. MoS₂ nanoflower-decorated reduced graphene oxide paper for high-performance hydrogen evolution reaction[J]. Nanoscale, 2014, 6(11): 5624-5629.
- [23] YI Mei-rong, ZHANG Chen-hui. The synthesis of two-dimensional MoS₂ nanosheets for enhanced tribological property as oil additives[J]. RSC advances, 2018, 8: 9564-9573.
- [24] CAI Yang-Sheng, YANG Hu-Lin, ZHOU Jiang, et al. Nitrogen doped hollow MoS₂/C nanospheres as anode for long-life sodium-ion batteries[J]. Chemical engineering Journal, 2017, 327: 522-529.
- [25] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
WEN Shi-zhu, HUANG Ping. Principles of tribology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012.
- [26] TANNOUS J, DASSENNOY F, LOHOUJ I, et al. Understanding the tribochemical mechanisms of IF-MoS₂ nanoparticles under boundary lubrication[J]. Tribology letters, 2011, 1(41): 55-64.
- [27] OFER T, PALLE V H, RONIT P B, et al. Friction mechanism of individual multilayered nanoparticles[J]. PNSA, 2011, 50(108): 19901-19906.

(上接第 44 页)

- [22] RUDNICK L R. 润滑油添加剂化学与应用[M]. 李华峰译. 北京: 中国石化出版社, 2006.
RUDNICK L R. Lubricant additives chemistry and application[M]. LI Hua-feng, translated. Beijing: China Petrochemical Press, 2006.
- [23] MORINA A, NEVILLE A, PRIEST M, et al. ZDDP and MoDTC interactions in boundary lubrication—The effect of temperature and ZDDP/MoDTC ratio[J]. Tribology international, 2006, 39(12): 1545-1557.
- [24] ROSHAN R, PRIEST M, NEVILLE A, et al. A Boundary lubrication friction model sensitive to detailed engine oil formulation in an automotive cam/follower interface[J]. Journal of tribology-transactions of the ASME, 2011, 133(4): 042101.
- [25] 时晓露. 微纳米层状润滑油添加剂的减摩抗磨性能研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2017.
SHI Xiao-lu. Study on the tribological properties of micro/nano lamellar lubricant additives[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, 2017.
- [26] 王稳, 李国良, 刘宏亮, 等. ZDDP 与 MoDTC 在含酯类油的 PAO 基础油中的抗磨性能研究[J]. 石油炼制与化工, 2019, 50(12): 65-69.
WANG Wen, LI Guo-liang, LIU Hong-liang, et al. Study on anti-wear performance of ZDDP and MoDTC in PAO base oil containing ester[J]. Petroleum processing and petrochemicals, 2019, 50(12): 65-69.
- [27] 井致远, 许一, 张伟, 等. 有机钼作为润滑油添加剂的研究发展现状[J]. 材料导报, 2016, 30(13): 94-101.
JING Zhi-yuan, XU Yi, ZHANG Wei, et al. research progress of organic molybdenum as lubricating additive[J]. Material review, 2016, 30(13): 94-101.
- [28] 刘金亮, 李琪, 夏延秋. 油溶性有机钼与二烷基二硫代磷酸锌(ZnDDP)在酯类油中的协同抗磨减摩性能及机理研究[J]. 摩擦学学报, 2009, 29(1): 5-9.
LIU Jin-liang, LI Qi, XIA Yan-qiu. Anti-wear and friction-reduction properties and mechanism of organic molybdenum compounds and zinc dialkyldithiophosphate (ZnDDP) in lipid synthetic oil[J]. Tribology, 2009, 29(1): 5-9.
- [29] 谢凤, 胡建强, 郑发正, 等. 非活性有机钼与二烷基二硫代磷酸锌的抗磨协同效应[J]. 石油学报(石油加工), 2007(2): 24-29.
XIE Feng, HU Jian-qiang, ZHENG Fa-zheng, et al. Anti-wear synergism between organic molybdate containing no sulphur and phosphorus and ZnDDP[J]. Acta petrolei sinica (petroleum processing section), 2007(2): 24-29.
- [30] 张瑞军, 李生华, 金元生, 等. 温度对二烷基二硫代甲酸钼摩擦学性能的影响[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2001, 41(11): 80-83.
ZHANG Rui-jun, LI Sheng-hua, JIN Yuan-sheng, et al. Effect of temperature on tribological performances of molybdenum dialkyldithiocarbamate[J]. J Tsinghua Univ (sci& tech), 2001, 41(11): 80-83.