

含磷极压抗磨剂抗微点蚀性能评价和机理分析

张继平¹, 王鹏², 郝利峰³, 戴媛静⁴, 李小磊¹

(1.清华大学天津高端装备研究院, 天津 300300; 2.中国石油兰州润滑油研究开发中心, 兰州 730060; 3.湖州师范学院 求真学院, 浙江 湖州 313000; 4.清华大学, 北京 100084)

摘要: **目的** 评价三种含磷极压抗磨剂的抗微点蚀性能并分析其作用机理。**方法** 使用 MPR 模拟微点蚀试验机考察三种含磷极压抗磨剂(磷型 P-1、硫磷型 P-2、分散型 P-3)的抗微点蚀性能。使用四球试验机、铜片腐蚀试验仪、烘箱、油膜厚度测试仪等, 评价添加剂的摩擦、抗腐蚀、抗氧化性能及油膜形成能力, 分析添加剂抗微点蚀性能与上述性能之间的关系。借助 SEM 测试分析不同添加剂的抗微点蚀机理。**结果** 添加 P-3 的润滑油 GO-3 的综合性能最好, GO-3 具有良好的抗微点蚀性能, 9 h MPR 试验的辊子轨道宽度变化率为 35.87%。GO-3 具有良好的极压抗磨减摩性能, 四球机试验测得其最大无卡咬负荷为 1441.6 N, 磨斑直径为 0.38 mm, 在试验载荷大于 294 N 时, 其摩擦系数最低。GO-3 的抗腐蚀性能良好, 铜片腐蚀试验级别为 1b。GO-3 的氧化腐蚀性低, 烘箱氧化试验中铜片评分为 1 分, 且无油泥产生。GO-3 的油膜形成能力强, 60~120 °C 时弹性流体润滑油膜的厚度为 371.2~153.6 nm。**结论** 分散型磷氮极压抗磨剂 P-3 化学活性适中, 可以避免在摩擦表面发生严重腐蚀或剧烈摩擦化学反应, 具有良好的承载、减摩、抗磨和抗微点蚀性能。

关键词: 含磷极压抗磨剂; 抗微点蚀; 抗磨减摩; 油膜厚度; 摩擦氧化; 抗腐蚀

中图分类号: TG172; TE65 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)09-0045-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.09.004

The Study of the Anti-micro-pitting Performance of the EP&AW Additives

ZHANG Ji-ping¹, WANG Peng², HAO Li-feng³, DAI Yuan-jing⁴, LI Xiao-lei¹

(1.Tianjin Research Institute for Advanced Equipment, Tsinghua University, Tianjin 300300, China;
2.PetroChina Lanzhou Lubricating Oil R&D Institute, Lanzhou 730060, China; 3.Qiuzhen College,
Huzhou University, Huzhou 313000, China; 4.Tsinghua University, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: To evaluate the anti-micro-pitting performances of three extreme pressure & antiwear (EP&AW) additives containing phosphorus, MPR tests which can simulate the micro-pitting conditions were conducted. Meanwhile, four-ball tribometer, copper corrosion tester, baking oven and lubricating film thickness meter were used to study the other performances of tribology, anti-corrosion, antioxidant and lubricating film. Moreover, mechanism of anti-micro-pitting was investigated in detail. The oil with dispersed phosphorus and nitrogen EP&AW additive can show the best overall performance. After 9 hours MPR test of the oil added with dispersed phosphorus and nitrogen EP&AW additive, change rate of MPR roll track width is

收稿日期: 2020-07-13; 修订日期: 2020-08-13

Received: 2020-07-13; Revised: 2020-08-13

作者简介: 张继平(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为润滑油极压抗磨添加剂合成及配方调合。

Biography: ZHANG Ji-ping (1978—), Male, Master, Senior engineer, Research focus: EP&AW additive synthesis and formula blend of lubricant oil.

通讯作者: 戴媛静(1977—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为金属加工润滑。邮箱: daiyj@tsinghua-tj.org

Corresponding author: DAI Yuan-jing (1977—), Female, Master, Senior engineer, Research focus: metalworking lubrication. E-mail: daiyj@tsinghua-tj.org

引文格式: 张继平, 王鹏, 郝利峰, 等. 含磷极压抗磨剂抗微点蚀性能评价和机理分析[J]. 表面技术, 2020, 49(9): 45-52.

ZHANG Ji-ping, WANG Peng, HAO Li-feng, et al. The study of the anti-micro-pitting performance of the EP&AW additives[J]. Surface technology, 2020, 49(9): 45-52.

35.87%。With four-ball tribometer test of this oil, maximum non-seizure load of 1441.6 N is obtained, and its relevant wear diameter of ball is 0.38 mm. When test load of four-ball test is bigger than 294 N, friction coefficient of the oil with dispersed phosphorus and nitrogen EP&AW additive is the smallest. Moreover, anticorrosion and antioxidant performance of this oil is good, copper corrosion grade is 1b, and steel disc grade is 1 score with no oil sludge. The oil with dispersed phosphorus and nitrogen EP&AW additive can form lubricating film with thickness of 371.2~153.6 nm when temperature is 60~120 °C. The dispersed phosphorus and nitrogen EP&AW additive possesses moderate chemical activity and shows the best overall performances.

KEY WORDS: EP&AW additive containing phosphorus; anti-micro-pitting; anti-wear & anti-friction; oil film thickness; friction oxidation; anti-corrosion

齿轮微点蚀是指在齿轮啮合过程中两齿面微凸体直接接触,在较高的接触及剪切应力作用下,齿面温度局部升高,导致油膜或化学反应膜容易破裂,进而齿面发生弹塑性变形,同时伴随着齿轮表面微小裂纹的产生和材料的转移^[1]。微点蚀是齿轮(尤其是低速重载齿轮)常见的一种疲劳损坏现象,一般发生在边界润滑状态下滚动/滑动接触的齿轮上,是一种在靠近齿轮表面产生微小裂缝的疲劳失效现象。微点蚀产生的裂缝会以一定角度向材料内部发展,形成5~10 μm深的微坑,这些微坑聚合会在齿轮表面产生一个连续的阴暗色表面^[2]。微点蚀将导致齿面产生微小的裂缝、坑点,引起噪音和振动,影响齿轮的啮合精度,严重时会引起断齿,影响整体装备的运行寿命。目前,微点蚀已经成为影响低速重载齿轮的传动精度、使用寿命及运行可靠性的一个重要影响因素。

从润滑角度看,微点蚀是设备工作表面处于弹性流体润滑或边界润滑状态下的滚动和滑动接触赫兹压力引起的疲劳破坏。从油品的角度出发,可以通过增加润滑油的黏度来实现接触区域有效油膜的增厚,从而减少微点蚀的发生,但较高的黏度会增加齿轮传动过程中的搅动损失,带来更多的热量和能量损耗。因此,需要通过在保持或减少润滑油黏度的同时,利用极压抗磨剂实现对微点蚀的控制。极压抗磨剂是调制齿轮油的核心添加剂,但其对齿轮油抗微点蚀性能有何具体影响,一直是添加剂合成和配方开发人员较为关心的问题。黄华梁等^[3]考察了ZDDP、硫化烯烃、磷酸三丁酯对齿轮点蚀的影响,结果表明,ZDDP的效果最差,磷酸三丁酯的效果最好,这说明P类添加剂是性能良好的抗点蚀添加剂。丁津原等^[4]研究了十八胺对接触疲劳的影响,认为含氮添加剂提高接触疲劳寿命的机理是添加剂在摩擦表面形成聚合物,从而起到保护摩擦表面的作用,氮原子与铁形成的金属化合物FeN在摩擦副表面聚合,胺基可以与添加剂中的极性基团结合,从而降低对金属的腐蚀,减弱极性物质对金属的作用,起到延缓疲劳裂纹的形成、扩展的作用。姚元鹏等^[5]使用MPR试验机考察了硫-磷型抗磨剂对齿轮油抗微点蚀性能的影响,结果表明,添加剂的结构对油品的抗微点蚀性能有很大的影响,活

性高的硫-磷剂不利于油品的抗微点蚀性能,结构稳定性好、分子中含有较长烷基链的三烷基苯基硫代磷酸酯能够降低发生微点蚀的概率。周康等^[6]采用MPR试验机和FZG试验机,考察了亚磷酸烷基酯、芳基磷酸酯和二硫代磷酸酯3种结构不同的含磷抗磨剂在工业齿轮油中的抗微点蚀性能,结果表明,3种含磷抗磨剂的加入对工业齿轮油抗微点蚀性能都有所改善,其中亚磷酸烷基酯的热分解温度高,结构稳定性好,在油样测试时,辊子表面微点蚀面积为3.12%,轨道宽度变化率为26.6%,齿轮表面轮廓偏差为5.64 μm,表面微点蚀面积为75.12%,试验结果优于加入二硫代磷酸酯和芳基磷酸酯的油样,具有更加优异的抗微点蚀性能。Hong等^[7]通过对GL-5齿轮油的FZG微点蚀试验发现含磷的AW添加剂是抗微点蚀的关键,磷酸盐/亚磷酸盐-氧化物层的形成可以增强齿轮的抗微点蚀能力。Brian等^[8]在FZG微点蚀试验机上研究了极压抗磨剂、金属减活剂对齿轮微点蚀的影响,研究表明,合理复配上述添加剂可以有效地抑制齿轮微点蚀的发生。Laine等^[9]研究了润滑油对微点蚀和磨损的影响,结果表明,含有相同浓度ZDDP添加剂的润滑油,在三接触圆盘抗点蚀试验中的结果与在高频往复试验机上的结果相反,其原因是ZDDP阻止了粗糙表面的跑合。此外,根据一些研究者的研究结果表明,降低油品摩擦系数可以减少微点蚀现象的发生^[10]。

现有研究主要从摩擦性能/分子结构等方面阐述极压抗磨剂的抗微点蚀作用机理,但实际上极压抗磨剂的抗腐蚀、抗氧化、油膜厚度等也会影响其抗微点蚀性能。含磷极压抗磨剂氧化后会产生腐蚀性物质,引起金属表面腐蚀/锈蚀,导致微点蚀现象发生或加速微点蚀发展^[11]。有研究者建立了预测FVA54/I-IV微点蚀标准试验结果的数学模型,显示弹流润滑油膜厚度越大,抗微点蚀通过的负荷级越高,即抗微点蚀能力越强^[12]。本文使用MPR模拟微点蚀试验机,考察了三种含磷极压抗磨剂的抗微点蚀性能,同时考察了三种含磷极压抗磨剂的承载、抗磨、减摩、抗腐蚀、抗氧化、油膜厚度等性能,并分析了上述性能与抗微点蚀性能之间的关系,同时揭示了不同类型含磷极压

抗磨剂抗微点蚀的作用机理, 研究结果可为油品配方开发过程中选择具有良好抗微点蚀作用的含磷极压抗磨剂提供理论参考和技术支持。

1 实验

1.1 润滑油调配

实验使用的基础油组分是 PAO10 和 PAO40。PAO10 的主要理化性能: 100 °C 运动黏度 10.46 mm²/s, 黏度指数 135, 倾点 -48 °C。PAO40 的主要理化性能: 100 °C 运动黏度 39.25 mm²/s, 黏度指数 148, 倾点 -36 °C。使用的三种含磷极压抗磨剂包括 P-1 (磷酸三甲酚酯, 磷质量分数为 8.36%)、P-2 (二烷基二硫代磷酸衍生物, 磷质量分数为 9.46%)、P-3 (分散型酸性磷酸酯胺盐, 磷质量分数为 7.01%), 其分子结构分别如图 1 所示。

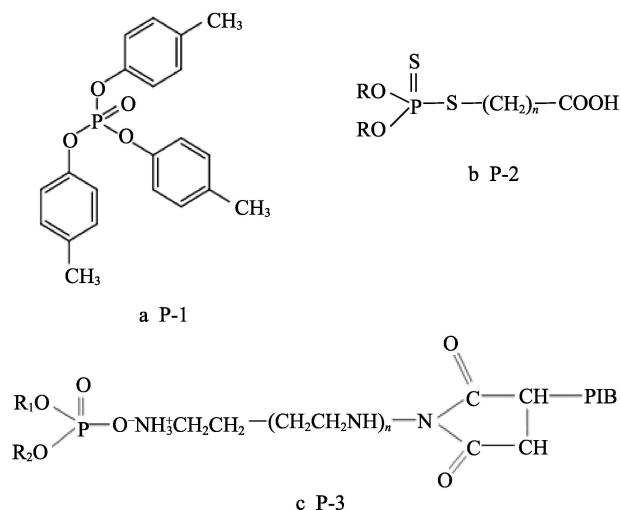


图 1 不同含磷极压抗磨剂的分子结构

Fig.1 Molecular structure of different EP&AW additives

为了考察各添加剂的各项性能, 将其分别以 1.0% (质量分数) 剂量调入基础油中, 然后在 65 °C 下搅拌 30 min。基础油由 10% (质量分数) 的 PAO10 和 90% (质量分数) 的 PAO40 组成, 其 40 °C 运动黏度为 323.5 mm²/s, 黏度指数为 150。其中, 基础油命名为 GO-0 (Gear Oil-0), 添加三种含磷极压抗磨剂的润滑油分别命名为 GO-1、GO-2 和 GO-3。

1.2 实验方法

1.2.1 MPR 模拟微点蚀试验

使用英国 PCS 公司生产的 MPR 试验机进行模拟微点蚀试验。试验条件为: 温度 90 °C; 在主载荷为 395 N (与 FZG 微点蚀耐久性试验中载荷 (10 级) 相同) 下进行耐久性试验, 低于 395 N 下选取一系列连续载荷 (50、98、198 N) 进行磨合; 滑滚比为 0.2。以辊子摩擦轨道宽度变化率的结果评价不同含磷极

压抗磨剂的抗微点蚀性能。

1.2.2 四球长磨试验

长磨试验在厦门天机自动化有限公司的 MS-10A 四球摩擦试验机上进行。试验负荷为 392 N, 试验转速为 1200 r/min, 试验时间为 8 h, 室温。试验用钢球为 GCr15 钢球, 其直径为 12.7 mm, 硬度为 58~62HRC。试验完成后, 测定三个钢球的磨斑直径, 取其平均值作为最终磨斑的大小。

1.2.3 抗氧化实验

在 250 mL 烧杯中加入 200 mL 润滑油, 将 45 号钢片 (45 mm×45 mm×2 mm) 以和杯底约成 30°角浸于油中, 然后整体放置于 120 °C 的烘箱中 72 h, 然后取出钢片, 用石油醚冲洗, 观察钢片变色情况, 同时观察杯底是否有沉积物。其中, 钢片评级规定: 0 为钢片不变色; 1 为稍变色, 几乎与新片相同; 2 为局部淡白色; 3 为钢片淡白色, 擦去后钢片亮; 4 为红、黄、蓝、灰等彩色, 或有灰白色沉积物; 5 为局部灰黑色, 明显腐蚀; 6 为钢片灰黑, 剥落。杯底沉积物以多、中、少、无区分。同时测定试油氧化前后的磷含量, 剩余磷含量越高, 说明其抗氧化性能越好。

1.2.4 油膜厚度测试

使用英国 PCS 公司 EHD2 弹流润滑油膜厚度测试仪对实验油的弹流成膜性能进行测试, 实验中使用钢球-玻璃盘摩擦副, 试验负荷为 50 N, 试验温度分别为 60、90、120 °C。

1.2.5 磨痕表征

使用美国 FEI 公司生产的 Magellan 400 扫描电子显微镜对试验件进行表面形貌分析。

2 结果与讨论

2.1 承载、抗磨、减摩和抗腐蚀性能评价

不同含磷极压抗磨剂的承载、抗磨损、减摩和抗腐蚀性能评价结果见表 1 和图 2。

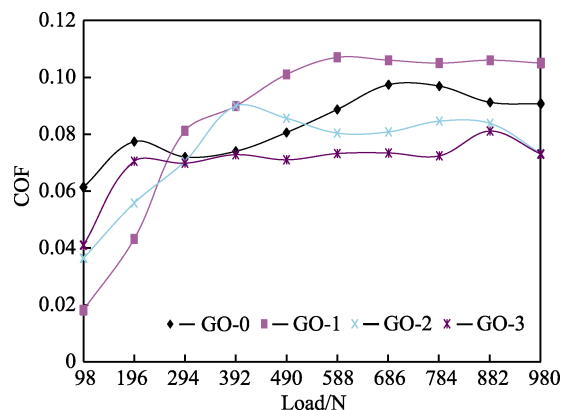


图 2 不同润滑油的摩擦系数 (试验方法: SH/T 0762)
Fig.2 Friction coefficients of different oils (Test method: SH/T 0762)

表 1 不同含磷极压抗磨剂的性能对比
Tab.1 Performance comparison of different EP&AW additive containing phosphorus

No.	Base oil	Additive	Four-ball test		Copper sheets corrosion (121 °C, 3 h) grade
			P_B/N	d^{392}/mm	
GO-0	100%		706.1	0.70	2a
GO-1	99%	1%P-1	1078.7	0.44	2a
GO-2	99%	1%P-2	2157.5	0.67	3b
GO-3	99%	1%P-3	1441.6	0.38	1b
Test method			GB/T 3142	NB/SH/T 0189	GB/T 5096

从表 1 的结果可知, 添加剂的加入均提高了基础油的承载和抗磨损性能, 其中 P-2 对基础油 P_B 的提高效果最好, 但它造成的磨损和对铜片造成的腐蚀也最严重, 表明添加剂 P-2 的活性较高, 会与金属表面发生剧烈的化学反应, 对金属表面造成较为严重的腐蚀。磷酸酯类化合物 P-1 的活性较低, 因此腐蚀性较低, 它的加入并没有降低基础油的抗腐蚀性能, 但是由于其活性低的缘故, 该添加剂对基础油抗磨损性能的改善效果一般。P-3 提高了基础油的承载和抗磨损性能, 同时对铜片造成的腐蚀最小, 说明 P-3 具有适中的活性, 同时具有良好的承载、抗磨损和抗腐蚀能力。P-3 分子中碱性聚异丁烯丁二酰亚胺的引入可以降低酸性磷酸酯的活性, 还能与润滑油中会诱发腐蚀性的物质形成胶束, 并与它们络合成油溶性的液体分

散于油中^[13], 可以减轻添加剂的腐蚀性。图 2 为四球实验中摩擦系数随载荷变化的曲线。从图 2 的结果可知, 当载荷大于等于 294 N 后, GO-1 的 COF 最高, GO-3 的 COF 最小且最平稳。

2.2 长磨试验

不同含磷极压抗磨剂长磨试验后, 钢球表面 SEM 图和钢球表面元素含量、磨斑直径结果见图 3 和表 2。图 3 中, 1 为 GO-0 摩擦区全部区域, 2 为 GO-1 摩擦区全部区域, 3 为 GO-1 摩擦反应剧烈区域, 4 为 GO-1 摩擦反应平缓区域, 5 为 GO-2 摩擦区全部区域, 6 为 GO-2 摩擦反应剧烈区域, 7 为 GO-2 摩擦反应平缓区域, 8 为 GO-3 摩擦区全部区域, 9 为 GO-3 摩擦反应剧烈区域, 10 为 GO-3 摩擦反应平缓区域。

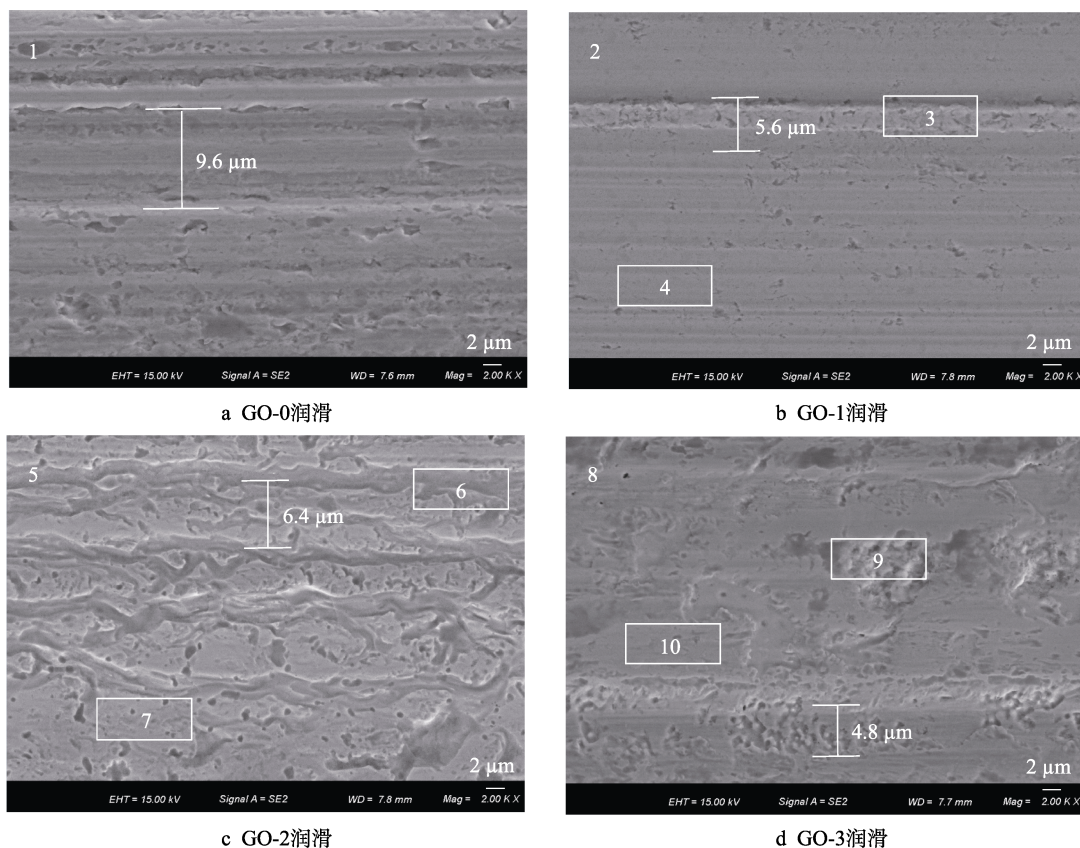


图 3 不同含磷极压抗磨剂润滑的钢球表面 SEM 图

Fig.3 SEM images of friction surfaces on steel balls lubricated by different EP&AW additives

表 2 钢球表面元素分布和磨斑直径 (WSD)
Tab.2 Element distribution of the friction surface on steel balls and WSD

Item	GO-0		GO-1		GO-2			GO-3		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C/%	6.81	4.71	6.37	7.06	6.37	5.78	3.61	5.45	4.38	5.67
O/%	5.47	1.73	2.25	—	8.45	5.72	6.64	6.91	10.25	—
Cr/%	1.53	1.48	1.24	1.82	1.25	1.49	1.34	1.41	1.36	1.38
Fe/%	86.19	91.50	89.25	91.12	81.60	85.44	86.54	84.21	80.75	92.95
P/%	—	0.58	0.89	—	2.33	1.56	1.88	2.03	3.26	—
WSD/mm	1.00		0.55			0.56			0.48	

从图 3 和表 2 的结果可知,纯基础油不含抗磨损元素,因此磨损严重,形成的犁沟宽度为 9.6 μm,磨斑直径最大。P-1 的加入减轻了钢球表面的磨损,形成的犁沟宽度为 5.6 μm,磨斑直径明显降低。P-1 润滑的钢球表面磷含量较低,表明其化学活性较低,与钢球表面没有发生剧烈的摩擦化学反应。P-2 的加入明显改变了钢球表面磨斑的形貌,主要是产生了较多的脊起和波纹,形成的犁沟宽度为 6.4 μm。这是由于其化学活性高,与钢球表面产生了较为剧烈的化学反应,这也是 GO-2 润滑的钢球表面各个区域磷含量均较高的原因。P-3 具有适中的化学活性,没有明显改变钢球表面磨斑形貌,形成的犁沟宽度为 4.8 μm,相应的磨斑直径最小。此外,虽然 P-2 的分子中含有 S 元素(图 1),但在钢球表面未检测到硫元素,这是由于试验条件不够苛刻,没有达到元素硫参加摩擦化学反应的温度^[14]。

2.3 抗氧化性能

不同含磷极压抗磨剂的烘箱氧化结果见表 3 和图 4—5。可以看出,三个添加剂均具有较好的抗氧化性能,烧杯底部均没有生成沉积物(图 4),且对钢片产生的腐蚀较小(图 5)。其中,P-3 的抗氧化

表 3 不同含磷极压抗磨剂的烘箱氧化结果
Tab.3 oven oxidation result of different EP&AW additive containing phosphorus

Item	GO-0	GO-1	GO-2	GO-3
Conservation rate of P/%	—	99.80	90.71	99.90
Sludge of cup bottom	Nothing	Nothing	Nothing	Nothing
Grade of steel disc (score)	2	2	2	1

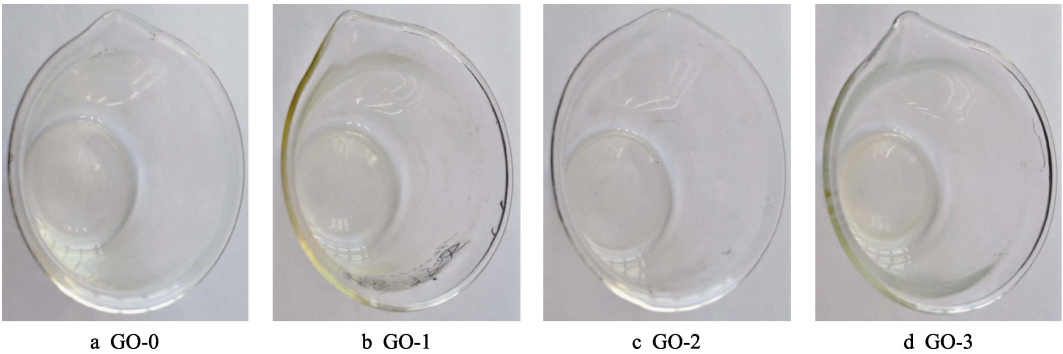


图 4 烘箱氧化后的烧杯图
Fig.4 Images of beakers after the antioxidant test

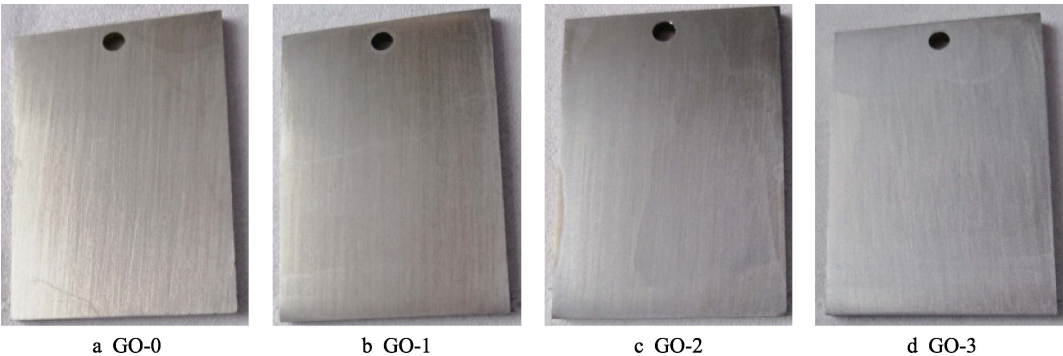


图 5 烘箱氧化后的钢片
Fig.5 Images of steel discs after the antioxidant test

性能最好,其有效元素磷保持率为99.90%(表3),几乎没有损失,钢片也几乎与新片相同。这是由于P-3分子中聚异丁烯丁二酰亚胺对氧化产物(如油泥等)具有良好的分散作用,氧化生成的物质被均匀分散在油中,不会沉积,也不会对钢片造成腐蚀。

2.4 油膜厚度

四种润滑油的油膜厚度随温度和速度的变化规律如图6所示,不同温度下的运动黏度和压粘系数变化如表4所示。

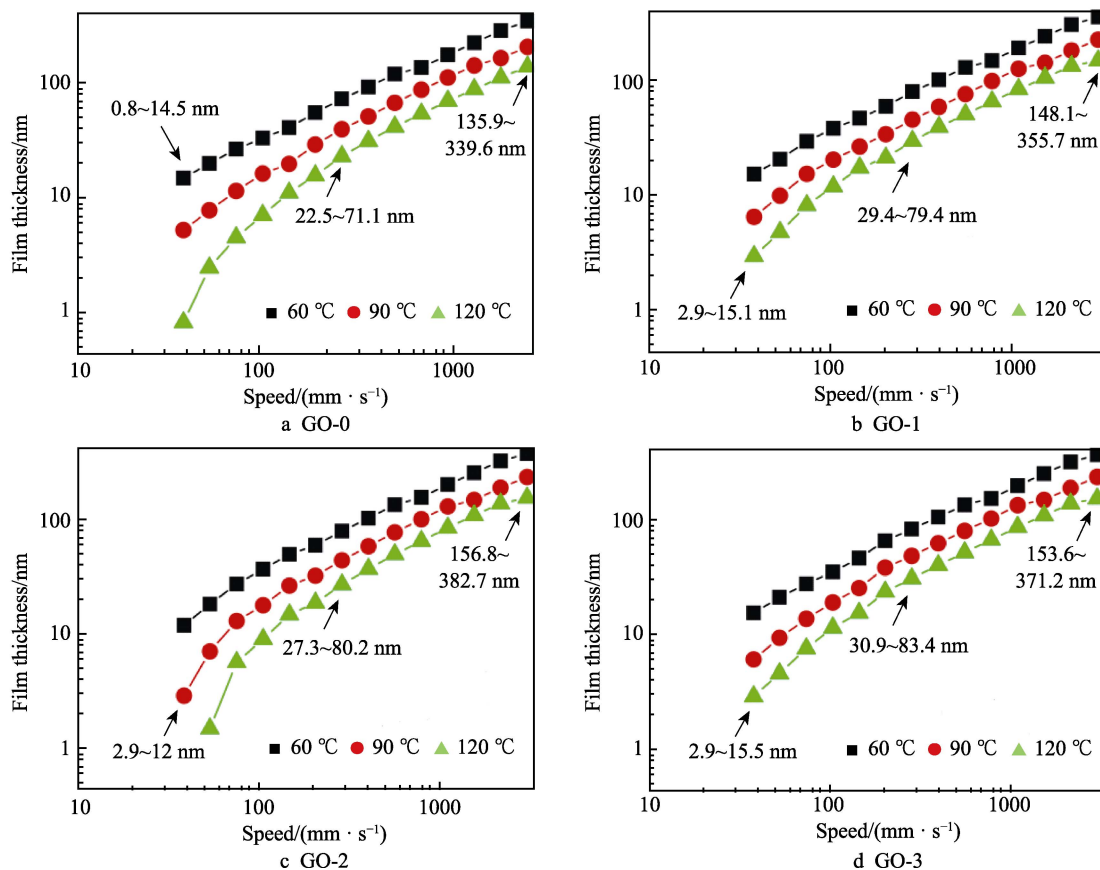


图6 不同润滑油在不同温度和速度下的油膜厚度

Fig.6 Thickness of lubricating film of different oils at different temperatures and velocities

表4 不同温度下润滑油的运动黏度和粘压系数

Tab.4 Dynamic viscosity and pressure-viscosity coefficient of different oils at different temperatures

Item	GO-0	GO-1	GO-2	GO-3	Test method
Dynamic viscosity of 60 °C/(mm ² ·s ⁻¹)	131.33	127.33	131.00	130.33	GB/T 265
Dynamic viscosity of 90 °C/(mm ² ·s ⁻¹)	47.11	46.00	46.95	46.90	
Dynamic viscosity of 120 °C/(mm ² ·s ⁻¹)	21.98	21.57	21.97	21.86	
Pressure-viscosity coefficient of 60 °C/(×10 ⁻⁸ Pa)	3.41	3.56	3.60	3.58	Calculation ^[15]
Pressure-viscosity coefficient of 90 °C/(×10 ⁻⁸ Pa)	2.66	2.73	2.79	2.76	
Pressure-viscosity coefficient of 120 °C/(×10 ⁻⁸ Pa)	2.15	2.22	2.30	2.28	

从图6的结果可知,不同温度下加入不同含磷极压抗磨剂的基础油形成的油膜厚度均大于GO-0,表明这三种添加剂均具有良好的油膜形成能力。随着转速的提高,摩擦区逐步进入弹性流体润滑状态,在该状态下,纯基础油形成的油膜厚度在135.9~339.6 nm之间,GO-1形成的油膜厚度在148.1~355.7 nm之间,GO-2形成的油膜厚度在156.8~382.7 nm之间,GO-3形成的油膜厚度在153.6~371.2 nm之间。从表4的结

果可知,加入不同含磷极压抗磨剂后,不同温度下GO-0的运动黏度下降,但粘压系数增大。油膜厚度的差异不仅与运动黏度有关,还有压粘系数相关。由于粘压系数的提高,加入不同含磷极压抗磨剂的基础油形成的油膜比纯基础油厚^[15]。另外,添加含磷极压抗磨剂后,不同润滑油的油膜形成能力为GO-2>GO-3>GO-1,这是由于P-2、P-3、P-1加入基础油后,运动黏度和压粘系数依次降低,相应形成的油膜厚度依次减小。

2.5 抗微点蚀性能评价及机理分析

不同含磷极压抗磨剂的 MPR 模拟微点蚀结果见表 5，其辊子表面磨痕形貌如图 7 所示。在 MPR 试验的评价标准中，使用辊子摩擦轨道宽度变化率来区分不同试样的抗微点蚀性能优劣^[16-18]。辊子摩擦轨道宽度变化率越小，表明试样的抗微点蚀性能越好。从表 5 的结果可知，不同试验时间的辊子轨道宽度变化率相比，GO-3 对应的辊子轨道宽度变化率最小，GO-2 对应的辊子轨道宽度变化率最大，上述结果表明 GO-3 具有最好的抗微点蚀性能。

表 5 MPR 模拟微点蚀试验结果
Tab.5 MPR simulation results

No.	Conservation rate of Roller track width/%	
	6 h	9 h
GO-0	36.84	53.61
GO-1	27.68	40.47
GO-2	37.10	58.87
GO-3	25.10	35.87

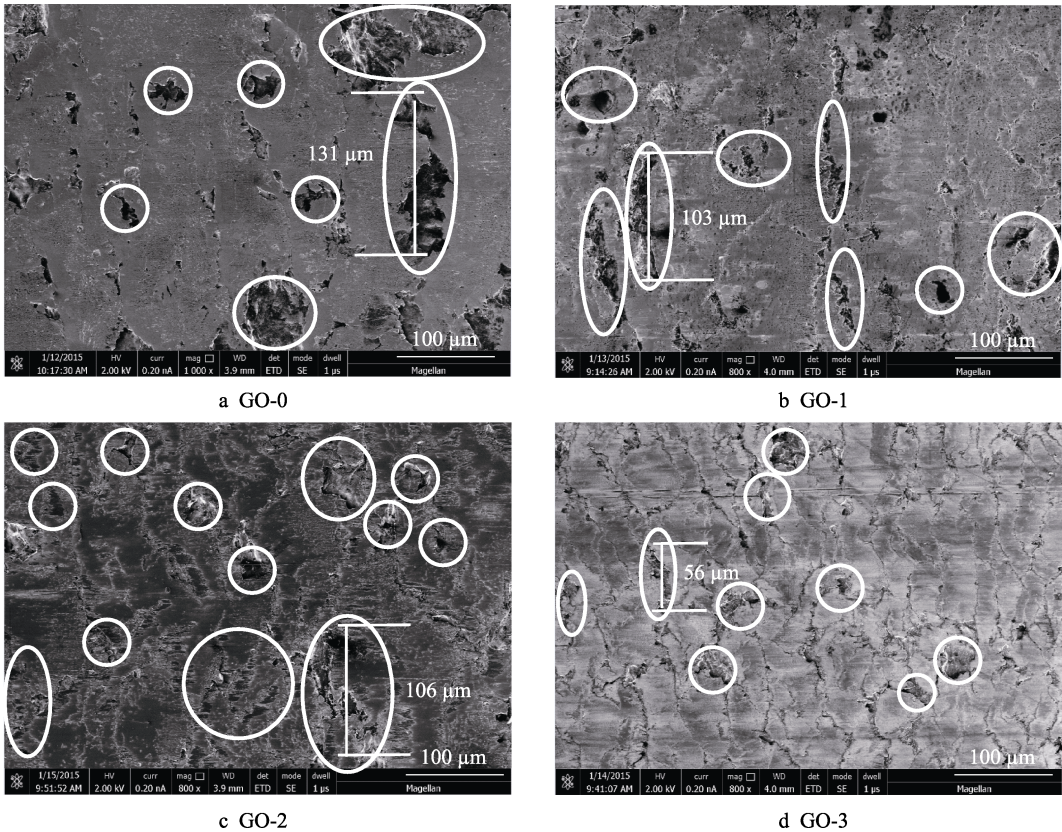


图 7 不同润滑油 MPR 模拟微点蚀试验后辊子表面 SEM 图
Fig.7 SEM images of rollers after the MPR test conducted with different oils

从图 7 的结果可知，GO-0 润滑的辊子摩擦表面形成了明显的微点蚀裂纹、凹坑，裂纹长达 131 μm。结合表 5 的结果可知，仅靠基础油的润滑而无极压抗磨剂的保护，辊子在 MPR 试验过程中出现了较为严重的微点蚀现象。与仅有基础油润滑的 GO-0 辊子相比，GO-1 润滑的辊子摩擦表面形成的微点蚀裂纹、凹坑在大小和密度方面均有所降低，裂纹长度减小为 103 μm，结合表 5 的结果可知，其相应的辊子轨道宽度变化率同样减小。GO-2 润滑的辊子摩擦表面形成的微点蚀裂纹和凹坑较多，以至于其相应的辊子轨道宽度变化率大于 GO-0，这是由于调合该油的 P-2 抗磨损性和抗腐蚀性差，试验过程中对试件造成了较大的磨损，从而导致辊子摩擦轨道宽度变化率最大。GO-3

润滑的辊子摩擦表面形成的微点蚀裂纹、凹坑最少，裂纹长度明显降低，只有 56 μm，结合表 5 的结果，其相应的辊子轨道宽度变化率也是最小的，这是由于调合该油的 P-3 同时具有良好的承载、抗磨损和抗腐蚀能力，可以最大限度地保护摩擦表面，从而降低了辊子摩擦轨道宽度变化率。上述结果表明：在考察的三个含磷极压抗磨剂中，P-3 具有最优的抗微点蚀性能。

3 结论

1) 在考察的磷型、硫磷型、分散型磷氮极压抗磨添加剂中，分散型磷氮极压抗磨剂 P-3 具有改善基

础油承载、抗磨、减摩性能的效果,能够使基础油 GO-0 的 P_B 值提高 50% 以上,磨斑直径降低 40% 以上,摩擦系数降低 10% 以上。

2) 添加 P-3 的润滑油 GO-3 具有良好的抗腐蚀和抗氧化性能,121 °C 下 3 h 铜片腐蚀等级为 1b,150 °C 下 72 h 烘箱氧化不产生油泥,对钢片腐蚀评分为 1 分。P-3 能够提高基础油形成的油膜厚度,GO-3 形成的油膜厚度在 153.6~371.2 nm 之间。MPR 模拟微点蚀试验测试 GO-3 润滑油时,辊子轨道宽度变化率小于 40%,且辊子表面形成的微点蚀裂纹、凹坑较少。

3) 分散型磷氮极压抗磨剂 P-3 的化学活性适中,可以避免在摩擦表面发生严重腐蚀或剧烈摩擦化学反应,减少微点蚀的发生。P-3 能够使基础油具有良好的承载、减摩、抗磨和抗微点蚀性能,是一种性能优异的润滑油添加剂。

参考文献:

- [1] 赵玉良,徐鸿钧,姜永涛. 风电齿轮的微点蚀研究[J]. 能源工程, 2010(4): 41-43.
ZHAO Yu-liang, XU Hong-jun, JIANG Yong-tao. Research on micropitting of gear flanks to wind turbine[J]. Energy engineering, 2010(4): 41-43.
- [2] OILA A, BULL S J. Assessment of the factors influencing micropitting in rolling/sliding contacts[J]. Wear, 2005(258): 1510-1524.
- [3] 黄华梁,王国宪,韦明英. 润滑油添加剂对提高齿轮抗点蚀疲劳的性能和机理研究[J]. 机械传动, 1992, 16(3): 48-56.
HUANG Hua-liang, WANG Guo-xian, WEI Ming-ying. Study on the performance and mechanism of lubricating oil additives to improve pitting fatigue of gear[J]. Journal of mechanical transmission, 1992, 16(3): 48-56.
- [4] 丁津原,杨文通,伍毅. 十八胺对接触疲劳的影响[J]. 东北工学院学报, 1992, 13(2): 134-138.
DING Jin-yuan, YANG Wen-tong, WU Yi. Effect of octadecylamine on contact fatigue[J]. Journal of Northeast University of Technology, 1992, 13(2): 134-138.
- [5] 姚元鹏,李小刚,周康,等. 硫-磷型抗磨剂对齿轮油抗微点蚀性能的影响[J]. 石油炼制与化工, 2018, 49(1): 70-74.
YAO Yuan-peng, LI Xiao-gang, ZHOU Kang, et al. Influence of S-P anti-wear agents on anti-micropitting[J]. Petroleum processing and petrochemicals, 2018, 49(1): 70-74.
- [6] 周康,李旭,蒲晨光,等. 含磷抗磨剂对工业齿轮油抗微点蚀性能的影响[J]. 石油炼制与化工, 2020, 51(1): 49-54.
ZHOU Kang, LI Xu, PU Chen-guang, et al. Effect of phosphorous-containing anti-wear agent on micropitting resistance of industrial gear oil[J]. Petroleum processing and petrochemicals, 2020, 51(1): 49-54.
- [7] HONG H S, HUSTON M E, CONNOR B M O, et al. Evaluation of surface fatigue performance of gear oils[J]. Lubrication science, 1998, 10(4): 365-380.
- [8] CONNOR B O. The influence of additive chemistry on micropitting[J]. Gear technology, 2005, 22(3): 34-41.
- [9] LAINE E, OLVER A V, BEVERIDGE T A. Effect of lubricants on micropitting and wear[J]. Tribology international, 2008, 41(11): 1049-1055.
- [10] LAINÉ E, OLVER A V, LEKSTROM M F, et al. The effect of a friction modifier additive on micropitting[J]. Tribol trans, 2009, 52(4): 526-533.
- [11] 张美琼,张霞玲,王凯明,等. 风电齿轮油抗微点蚀性能的影响因素综述[J]. 炼油与化工, 2018, 29(6): 4-5.
ZHANG Mei-qiong, ZHANG Xia-ling, WANG Kai-ming, et al. Summary of influence factors on anti-micropitting property of wind gear oil[J]. Refining and chemical industry, 2018, 29(6): 4-5.
- [12] 金志良,张宽德,雷爱莲. 工业齿轮油的抗疲劳性能及其评价[J]. 润滑油与燃料, 2010, 20(1): 11-15.
JIN Zhi-liang, ZHANG Kuan-de, LEI Ai-lian. Anti-fatigue performance and evaluation of industrial gear oil[J]. Lubes & fuels, 2010, 20(1): 11-15.
- [13] 黄文轩. 润滑油添加剂应用指南[M]. 第三版. 北京: 中国石化出版社, 2011: 27-28.
HUANG Wen-xuan. Application guide for lubricant additives[M]. Third edition. Beijing: Sinopec Press, 2011: 27-28.
- [14] 董凌修. 润滑原理及润滑油[M]. 第二版. 北京: 中国石化出版社, 1998: 112-113.
DONG Jun-xiu. Lubricating principle and lubricating oil[M]. Second edition. Beijing: Sinopec Press, 1998: 112-113.
- [15] 张文法,应自能,温诗铸. 一种从润滑油常压参数计算压粘系数的方法[J]. 机械设计, 1988(6): 39-43.
ZHANG Wen-fa, YING Zi-neng, WEN Shi-zhu. A method for calculating the pressure-viscosity coefficient from ordinary pressure parameters of lubricating oil[J]. Journal of machine design, 1988(6): 39-43.
- [16] 王鹏,张宽德,丁芳玲,等. 润滑油抗微点蚀性能试验研究[J]. 润滑油, 2013, 28(4): 42-47.
WANG Peng, ZHANG Kuan-de, DING Fang-ling, et al. Experimental research on anti-micropitting property of lubricating oil[J]. Lubricating oil, 2013, 28(4): 42-47.
- [17] 张继平,孙喆,淮文娟,等. 齿轮油和极压抗磨剂对齿轮抗微点蚀性能的影响[J]. 石油商技, 2018, 36(3): 17-22.
ZHANG Ji-ping, SUN Zhe, HUAI Wen-juan, et al. Influence of gear oil and extreme pressure & antiwear additive on gear anti-micro-pitting ability[J]. Petroleum products application research, 2018, 36(3): 17-22.
- [18] 王鹏,张宽德,谢惊春. 油品对微点蚀现象的影响分析[J]. 润滑油, 2012, 27(4): 16-19.
WANG Peng, ZHANG Kuan-de, XIE Jing-chun. Analysis on influencing factors of lubricating oil on micropitting[J]. Lubricating oil, 2012, 27(4): 17-22.