

# 低黏度 0W-16 汽油机油减摩性能研究

郝丽春, 杨鹤, 张威力, 卢文彤, 刘顺涛, 张建荣

(中国石化石油化工科学研究院, 北京 100083)

**摘要:** **目的** 研究低黏度 0W-16 机油的减摩性能。**方法** 选取 3 种减摩剂 MoDTC、GMO 和油酸酰胺, 分别按一定比例加入到 0W-16 基础油中, 获得单剂油样, 并选取 2 种 0W-16 全配方机油 (A-1 油和 A-2 油), 利用 SRV-IV 试验机测试润滑油样的减摩性能和极压性能, 利用傅立叶红外光谱仪和油料元素光谱分析仪分析机油油样结构, 并利用 3D 光学表面轮廓仪表征缸套块磨痕形貌。**结果** 对于单剂油样, 0W-16 基础油分别加入 MoDTC、GMO 和油酸酰胺后, 平均摩擦系数由 0.198 分别减小到 0.088~0.116、0.167~0.178 和 0.179~0.194, 缸套块磨痕平均深度由 3.59  $\mu\text{m}$  分别减小到 0.44~0.52  $\mu\text{m}$ 、2.11~2.24  $\mu\text{m}$  和 3.19~3.44  $\mu\text{m}$ 。对于 0W-16 全配方机油, 在摩擦润滑试验低温区, A-1 油比 A-2 油摩擦系数低, 随着温度升高, A-1 油和 A-2 油的摩擦系数进一步减小; 摩擦润滑试验后, A-1 油和 A-2 油的缸套块磨痕平均深度分别为 0.13  $\mu\text{m}$  和 0.18  $\mu\text{m}$ 。在极压试验中, A-1 油和 A-2 油的极压值分别为 1500 N 和 900 N。**结论** 在 0W-16 基础油中分别加入 3 种减摩剂后, MoDTC 的减摩和抗磨作用最好, 油酸酰胺的减摩和抗磨作用最差。对于 0W-16 全配方机油, 在摩擦润滑试验低温区, A-1 油中的无灰减摩剂和 MoDTC 产生协同作用, 表现出更低的摩擦系数; 随着温度升高, A-1 油和 A-2 油中的 ZDDP 与 MoDTC 产生协同作用, 进一步降低摩擦系数。在极压试验中, A-1 油中的 ZDDP 与其他添加剂产生协同作用, 表现出更大的极压值。添加剂之间的协同作用对油品节能性能产生重要影响。

**关键词:** 0W-16 汽油机油; MoDTC; 减摩剂; 摩擦润滑; 摩擦系数; 协同作用; SRV

**中图分类号:** TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)09-0072-09

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.09.007

## Friction-reduced Property of 0W-16 Low Viscosity Engine Oil

HAO Li-chun, YANG He, ZHANG Wei-li, LU Wen-tong, LIU Shun-tao, ZHANG Jian-rong

(SINOPEC Research Institute of Petroleum Processing, Beijing 100083, China)

**ABSTRACT:** The work aims to investigate the friction-reduced property of 0W-16 low viscosity engine oil. Three kinds of friction modifiers MoDTC, GMO, and oleamide were respectively added into 0W-16 base oil to obtain oil sample with single friction modifier. Moreover, two kinds of fully-formulated low viscosity engine oil 0W-16 (oil A-1 and oil A-2) were selected. The friction-reduced property and extreme pressure property of the lubricating oil samples were tested by the SRV-IV tribometer. The compositions of fully-formulated engine oil samples were analyzed by FTIR spectrometer and oil element spectrometer. The wear scar of cylinder liner segment was analyzed by 3D optical surface profilometer. Compared with 0W-16

收稿日期: 2020-07-22; 修订日期: 2020-08-27

Received: 2020-07-22; Revised: 2020-08-27

作者简介: 郝丽春 (1984—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为润滑油品测试及应用。邮箱: haolc.ripp@sinopec.com

**Biography:** HAO Li-chun (1984—), Male, Doctor, Senior engineer, Research focus: evaluation and application of lubricant. E-mail: haolc.ripp@sinopec.com

引文格式: 郝丽春, 杨鹤, 张威力, 等. 低黏度 0W-16 汽油机油减摩性能研究[J]. 表面技术, 2020, 49(9): 72-80.

HAO Li-chun, YANG He, ZHANG Wei-li, et al. Friction-reduced property of 0W-16 low viscosity engine oil[J]. Surface technology, 2020, 49(9): 72-80.

base oil, oil sample with single friction modifier of MoDTC, GMO and oleamide respectively had an average friction coefficient decreasing from 0.198 to 0.088~0.116, 0.167~0.178 and 0.179~0.194, respectively. The average wear scar depth of cylinder liner segments decreased from 3.59  $\mu\text{m}$  to 0.44~0.52  $\mu\text{m}$ , 2.11~2.24  $\mu\text{m}$  and 3.19~3.44  $\mu\text{m}$ , respectively. For the fully-formulated engine oil 0W-16, oil A-1 showed lower friction coefficient than oil A-2 in low temperature testing condition. When the testing temperature increased, the friction coefficients of oil A-1 and oil A-2 decreased further. The average wear scar depth of cylinder liner segments of oil A-1 and oil A-2 were 0.13  $\mu\text{m}$  and 0.18  $\mu\text{m}$  respectively after friction and lubrication test. The extreme pressure of oil A-1 and oil A-2 was 1500 N and 900 N respectively in extreme pressure test. When the base oil 0W-16 is blended with the three kinds of friction modifiers respectively, the oil with MoDTC shows the best friction-reduced property and anti-wear property, and the oil with oleamide shows the worst friction-reduced property and anti-wear property. For the fully-formulated engine oil A-1 in low temperature testing condition, there is a good synergistic effect between MoDTC and no-ash friction modifier, and oil A-1 shows lower friction coefficient. For the oil A-1 and oil A-2, when the testing temperature increases, ZDDP and MoDTC generate good synergistic effect and the friction coefficient decreases further. In the extreme pressure test, oil A-1 shows higher extreme pressure due to the good synergistic effect between ZDDP and other additives. The synergistic effects between additives have an important influence on the energy-saving property of engine oils.

**KEY WORDS:** 0W-16 engine oil; MoDTC; friction modifier; friction and lubrication; friction coefficient; synergistic effect; SRV

为了满足不断严格的排放要求和应对石油短缺，欧美日等汽车工业发达国家都在采取积极措施，以提高汽车燃料经济性水平。研究表明，发动机摩擦损失约占发动机燃料燃烧能量的 15%~20%<sup>[1-2]</sup>。国内外对机油黏度与发动机燃料经济性之间的关系进行了大量研究，结果表明，降低机油黏度能够有效减少发动机摩擦损耗，进一步提高发动机燃油经济性<sup>[3-5]</sup>。但是，机油低黏度化也会带来风险，如机油黏度降低使油膜厚度变薄，增加缸套/活塞环、凸轮/挺杆等部件的磨损概率，因而对机油添加剂配方提出了更为苛刻的要求。

经过近 30 年的发展，由美日汽车制造商及部分润滑油和添加剂联合组成的国际组织 ILSAC 颁布的节能发动机油已发展到 ILSAC GF-6 规格。ILSAC GF-6 规格分为 GF-6A 和 GF-6B，GF-6A 完全覆盖 GF-5 及更早的规格，GF-6B 只涉及黏度更低的汽油机油，如 SAE 0W-16 机油<sup>[6]</sup>。ILSAC GF-6 规格于 2011 年首次提出，在开发过程中面临巨大挑战，如机油低黏度化、燃油经济性、高温抗氧化性、低速早燃、正时链条磨损等技术难题。经过业界不断努力，该规格于 2019 年 4 月颁布，于 2020 年 5 月进行首批认证，是发动机润滑油技术发展的一次重要创新，其中燃油经济性是一直关注的重点。

由于 0W-16 汽油机油黏度小，发动机摩擦副的润滑状态将向混合润滑和边界润滑区移动，机油中的减摩剂对改善发动机节能性起主要作用。含钼有机添加剂具有良好的减摩作用，能够有效降低摩擦损耗，广泛用于发动机油中<sup>[7-8]</sup>。无灰减摩添加剂不含金属元素，具有不易产生颗粒物、能降解等优点，常用作机油减摩剂。本文将有机钼减摩剂 MoDTC、无灰减摩剂油酸甘油酯 GMO、油酸酰胺按一定比例加入到

0W-16 黏度级别的基础油中，配制成单剂油样，研究单一添加剂在 0W-16 基础油中的减摩性能。同时选取 2 种经过 GF-6 节能发动机台架测评的 0W-16 全配方机油，研究减摩剂在 0W-16 全配方机油中的减摩作用。通过对比单剂油样和全配方油样的减摩和抗磨性能，分析全配方机油中减摩剂与其他摩擦功能剂的协同作用，以期对 0W-16 汽油机油的开发提供支持。

1 试验

1.1 试验油样

通过 III+基础油调制黏度级别为 0W-16 汽油机油的基础油，按质量百分比配制 3 种减摩剂的单剂油样，获得 10 个试验油样，如表 1 所示。

表 1 单剂油样的减摩剂类型及配比  
Tab.1 Type of friction modifiers and blending proportion of oil sample with single friction modifier

Friction modifier	Mass percent/%
MoDTC	0.05, 0.10, 0.75, 1.10
GMO	0.10, 0.30, 0.50
Oleamide	0.05, 0.15, 0.30

本单位发动机台架试验室与 OEM 合作，建立了 GF-6 节能台架，评价 GF-6 机油配方的节油率。发动机台架工况基于 NEDC 测试循环，机油温度范围为 30~110  $^{\circ}\text{C}$ ，所用参比油为 0W-20 黏度级别的汽油机油。选取 2 个典型的经过节能台架评定的全配方 0W-16 机油油样 A-1 和 A-2，用于试验研究，其基本性质见表 2。油样 A-1 的节油率高，节能性能良好；油样 A-2 的节油率低，节能性能差。

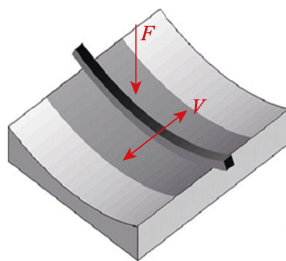
表2 0W-16全配方机油及0W-20参比油油样

Tab.2 Fully-formulated engine oil 0W-16 and reference oil 0W-20

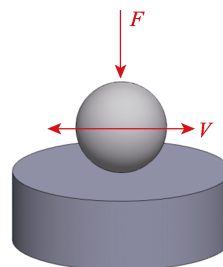
Oil samples	Specification	Viscosity grade	Kinematic viscosity/(mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	
			40 °C	100 °C
A-1	GF-6B	0W-16	27.21	6.219
A-2	GF-6B	0W-16	29.79	6.441
Reference oil	GF-5	0W-20	35.95	8.306



a SRV摩擦磨损试验机



b 缸套-活塞环示意图



c 球-盘接触示意图

图1 SRV摩擦磨损试验机及摩擦副示意图

Fig.1 Schematic diagram of SRV tribometer and friction pair: a) SRV tribometer; b) schematic diagram of cylinder-liner/piston-ring; c) schematic diagram of ball-plate friction contact pair

### 1.2.1 缸套-活塞环摩擦润滑试验方案

在发动机中,缸套-活塞环系统是最重要的摩擦副之一,其摩擦损失占比最大。截取部分发动机缸套,利用SRV-IV试验机缸套-活塞环试验模块,与活塞环形成缸套-活塞环摩擦副(见图1b),直接考察机油在缸套-活塞环摩擦副中的摩擦润滑特性。高温是缸套-活塞环处最突出的工作条件,对节能影响显著的润滑工况为边界润滑,同时结合SRV-IV试验机技术参数,设计了缸套-活塞环模拟试验:接触压力104 MPa,往复平均滑动速度0.18 m/s,温度采取程序升温条件,先在40 °C下运行20 min,然后逐步升温到120 °C,整个试验持续1 h。根据Dowson-Higginson线接触油膜厚度公式<sup>[9]</sup>,计算缸套-活塞环试验最小油膜厚度,并与缸套和活塞环综合粗糙度进行比较,以获得膜厚比 $\lambda$ 。 $\lambda$ 值小于0.2,表明SRV缸套-活塞环摩擦润滑试验处于边界润滑状态<sup>[10]</sup>。

### 1.2.2 极压能力试验方案

点接触和线接触摩擦副广泛存在于发动机中,如凸轮/挺杆、缸套/活塞环等。由于它们的接触压力高,如果润滑油的极压性能差,油膜就会发生破裂,产生较大的摩擦阻力和磨损,因此机油的极压性能也会对发动机节能性能产生影响。利用SRV-IV试验机球-盘试验模块(见图1c),依据NB/SH/T 0882—2014<sup>[11]</sup>润滑油极压性能测试标准,对试验油样的极压性能进行测定。所用试验钢球为AISI 52100钢,直径为10 mm,洛氏硬度为(60±2) HRC,表面粗糙度 $R_a$ 为(0.025±0.005)  $\mu\text{m}$ ;试验盘为AISI 52100钢,洛

## 1.2 摩擦润滑和极压能力试验

采用德国Optimol公司的SRV-IV摩擦磨损试验机(见图1a)进行摩擦润滑和极压能力试验,其载荷范围为0~2000 N,温度范围为室温~350 °C,频率范围为1~511 Hz,振幅范围为0.01~5 mm。利用SRV-IV试验机的缸套-活塞环试验模块(见图1b)测试试验油样的摩擦润滑性能;利用SRV-IV试验机的球-盘试验模块(见图1c)测试试验油样的极压能力。

氏硬度为(60±2) HRC,表面粗糙度 $R_a$ 为(0.043±0.007)  $\mu\text{m}$ ,直径为24 mm,厚度为7.85 mm。

## 1.3 油样结构和试验件形貌分析仪器及方法

为了分析润滑油样的减摩机理,采用Thermo Scientific公司的Nicolet 6700傅立叶红外光谱仪对润滑油样中的官能团进行表征,分辨率4  $\text{cm}^{-1}$ ,扫描次数16次。利用Spectro Scientific公司的Q100型油料元素光谱分析仪,采用旋转盘电极原子发射光谱法对润滑油样中的元素进行表征。摩擦润滑试验后,利用NPFLEX 3D光学表面轮廓仪表征缸套块磨痕形貌,分析润滑油样的磨损性能。

## 2 结果及分析

### 2.1 单剂油样的减摩性能分析

在边界润滑状态下,减摩剂种类和添加量对润滑油减摩性具有重要影响。不同减摩剂及含量的0W-16单剂油样在SRV缸套-活塞环试验中随温度变化的摩擦系数曲线见图2。由图2a可以看出,加入减摩剂MoDTC后,0W-16基础油摩擦系数明显降低。这是因为在试验过程中,MoDTC发生分解,在摩擦副表面生成 $\text{MoS}_2$ 、 $\text{MoO}_3$ 和 $\text{FeS}$ 等反应膜,有效降低了摩擦阻力<sup>[7,12-13]</sup>。随着单剂油中MoDTC含量的增加,摩擦系数进一步降低,当MoDTC含量增加到0.75%后,再提高MoDTC的含量,摩擦系数变化不大。MoDTC含量低(0.05%、0.1%)的单剂油样随着温度升高,摩擦系数逐渐升高。这是由于MoDTC含量

较少,随着试验的进行,不能产生足够的摩擦反应保护膜。MoDTC 含量高(0.75%、1.1%)的单剂油样随着温度升高,摩擦系数先逐渐降低,随后保持平稳。这是因为温度升高,润滑油黏度进一步降低,更多的表面粗糙峰将直接发生滑动接触,促使 MoDTC 分解而生成摩擦反应膜,从而降低摩擦系数<sup>[14]</sup>。

由图 2b 可以看出,0W-16 基础油加入减摩剂 GMO 后,能够降低摩擦系数。这是因为 GMO 分子中的—OH 具有很强的极性,能够吸附在摩擦副表面,

形成物理吸附膜,同时 GMO 分子在摩擦过程中会发生化学分解,产生的—OH 与摩擦副表面发生反应,生成摩擦反应膜,从而减少金属表面粗糙峰的直接接触,降低摩擦系数<sup>[15-16]</sup>。单剂油样中的 GMO 从 0.1% 增加到 0.3% 时,摩擦系数进一步降低,当 GMO 增加到 0.5% 时,摩擦系数与 0.3% GMO 的单剂油样摩擦系数相当。在试验初始阶段,当温度保持不变时, GMO 单剂油样的摩擦系数基本保持不变,当温度开始升高时,摩擦副表面 GMO 物理吸附膜的解吸附作用增强,导致摩擦系数增大。

由图 2c 可以看出,当 0W-16 基础油加入 0.05% 油酸酰胺减摩剂后,摩擦系数下降并不明显;当油酸酰胺加入量为 0.3% 时,与基础油相比,摩擦系数有所降低。油酸酰胺中的酰胺基团—CO—NH<sub>2</sub> 具有较强的极性,能够吸附到摩擦副表面形成物理吸附膜,同时发生摩擦化学反应,生成含 N、O 元素的反应膜<sup>[17-19]</sup>,具有一定的降低摩擦系数的作用。与 MoDTC 单剂油样和 GMO 单剂油样相比,油酸酰胺单剂油样的摩擦系数产生明显的振动现象,这可能是因为油酸酰胺产生的物理吸附膜和化学反应膜强度比较弱,在动态的摩擦过程中容易被破坏。在试验初始阶段,当温度保持不变时,油酸酰胺单剂油样的摩擦系数基本保持不变,当温度开始升高时,摩擦副表面的油酸酰胺物理吸附膜的解吸附作用变强,导致摩擦系数增大。

为了进一步比较 3 种添加剂的减摩作用,对 SRV 缸套-活塞环试验温升阶段的摩擦系数取算数平均值,得到 0W-16 基础油及单剂油样的平均摩擦系数,见图 3。由图 3 可以看出,0W-16 基础油加入减摩剂 MoDTC 后,平均摩擦系数由 0.198 减小到 0.088~0.116;加入减摩剂 GMO 后,平均摩擦系数减小到 0.167~0.178;加入油酸酰胺后,平均摩擦系数减小到 0.179~0.194。可以看出,在试验条件下,MoDTC 减摩性能最好,其次是 GMO,油酸酰胺的减摩性能最差。

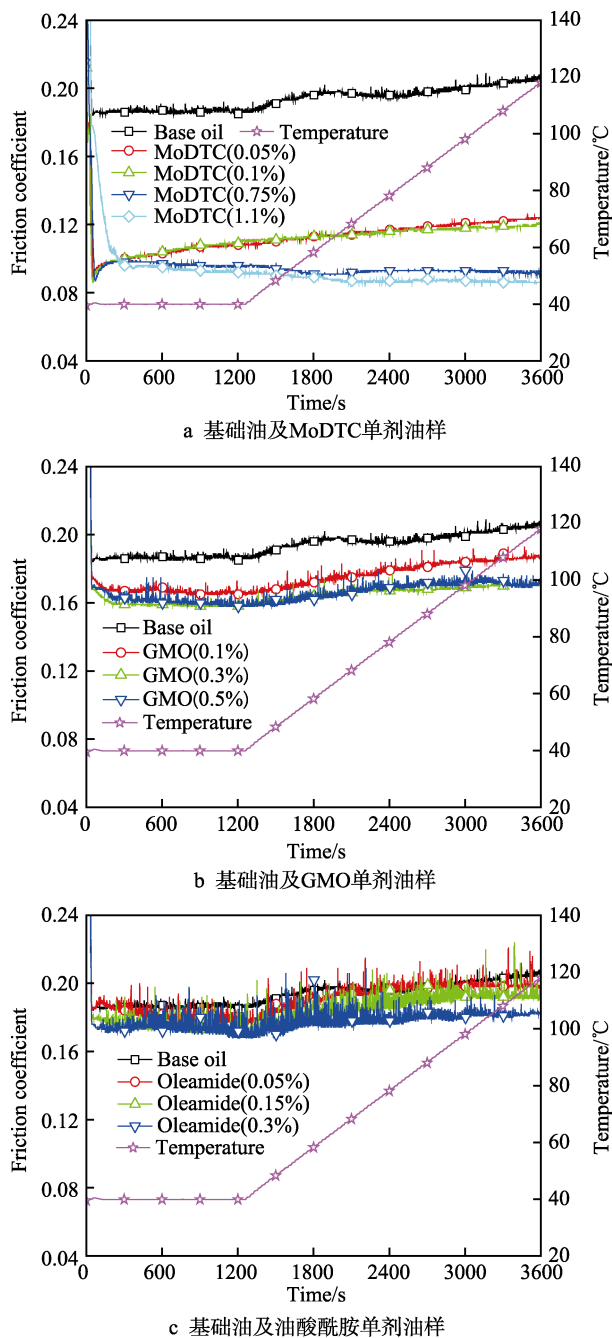


图 2 0W-16 基础油及单剂油样在 SRV 缸套-活塞环试验中的摩擦系数曲线

Fig.2 Friction coefficient curves of base oil 0W-16 and oil with a single friction modifier in SRV cylinder-liner/piston-ring tests: a) base oil and oil samples with MoDTC; b) base oil and oil samples with GMO; c) base oil and oil samples with oleamide

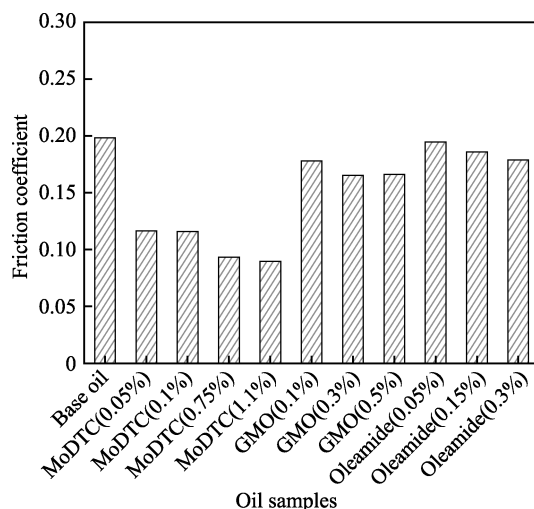


图 3 0W-16 基础油及单剂油样的平均摩擦系数

Fig.3 Average friction coefficients of base oil 0W-16 and oil with a single friction modifier



机油黏度降低后,油膜厚度变薄,其抗磨损性能需要关注。为了考察不同减摩剂的抗磨损性能,经 1 h SRV 缸套-活塞环摩擦试验后,通过 3D 光学表面轮廓仪测量得到 0W-16 基础油和单剂油样缸套块磨痕的 3D 形貌图,见图 4。其中图 4a 是试验后的缸套块照片,可以看出,缸套块上产生了均匀的带状磨痕,图 4a 中的 3 个长方框为 3D 形貌图的 3 个取样测量范围(包括中间位置、左侧位置、右侧位置),双向箭头

线表示摩擦试验中活塞环的往复运动方向。图 4b 是 0W-16 基础油试验后缸套块中间位置磨痕的 3D 形貌图(图 4b 中双向箭头线表示摩擦试验中活塞环的往复运动方向)。图 4c—e 分别是 1.1%MoDTC、0.5%GMO、0.3%油酸酰胺的单剂油样试验后,缸套块中间位置磨痕的 3D 形貌图,可以看出,缸套块上产生了较深的磨痕。通过 3D 光学表面轮廓仪测量缸套块 3 个取样范围内磨痕的深度,计算这 3 个取样范

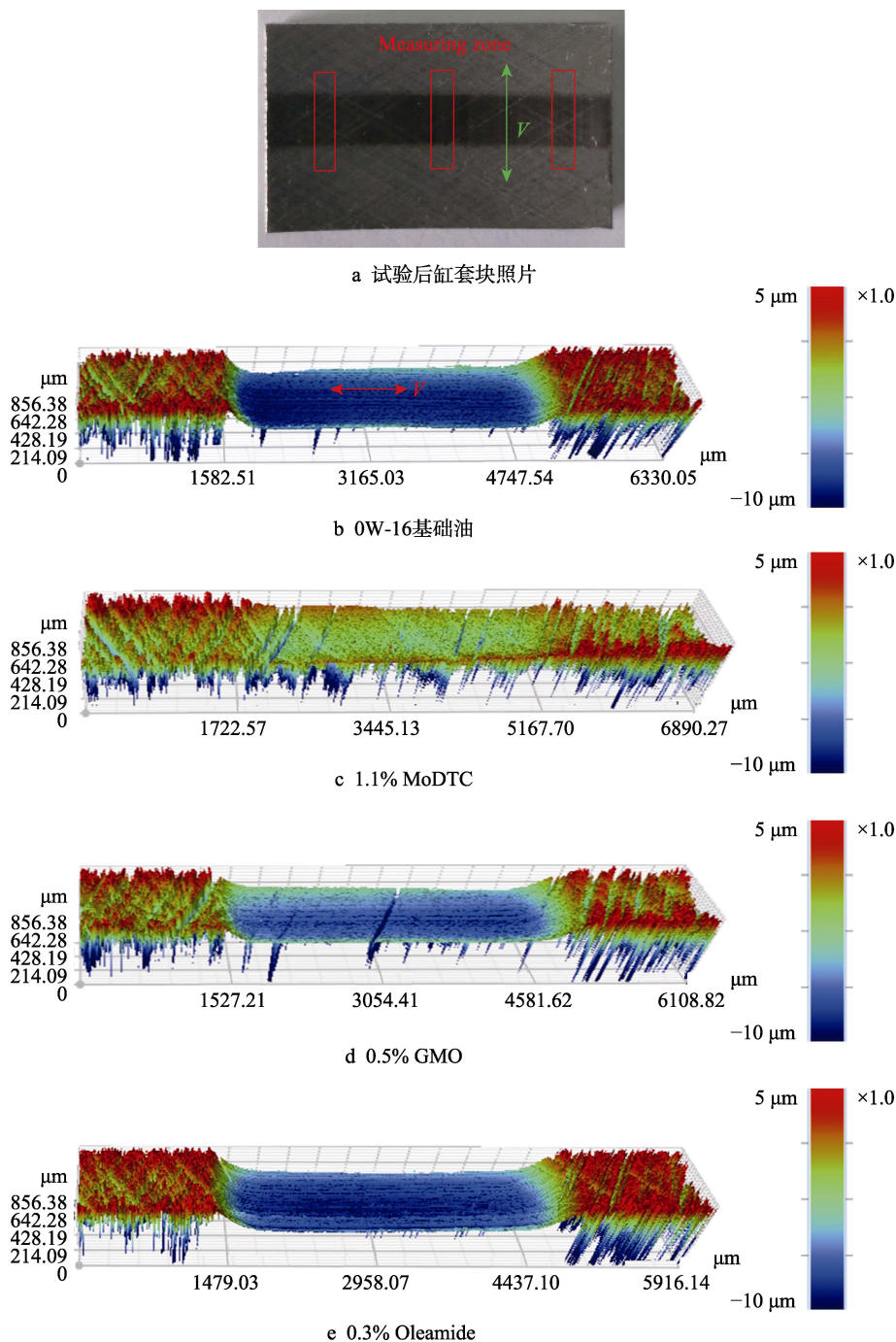


图4 0W-16 基础油和单剂油摩擦试验后缸套块磨痕 3D 形貌图

Fig.4 3D topographies of cylinder liner segments of base oil 0W-16 and oils with a single friction modifier after tests: a) picture of cylinder liner segment after test, b) base oil 0W-16; c) MoDTC with 1.1% content; d) GMO with 0.5% content; e) oleamide with 0.3% content

围内磨痕深度的平均值, 见图 5。由图 5 可以看出, 0W-16 基础油的缸套块磨痕平均深度为  $3.59\ \mu\text{m}$ ; 加入减摩剂 MoDTC 后, 缸套块磨痕平均深度减小到  $0.44\sim 0.52\ \mu\text{m}$ ; 加入减摩剂 GMO 后, 缸套块磨痕平均深度减小到  $2.11\sim 2.24\ \mu\text{m}$ ; 加入减摩剂油酸酰胺后, 缸套块磨痕平均深度减小到  $3.19\sim 3.44\ \mu\text{m}$ 。可以得出, 减摩剂 MoDTC 的抗磨损性能最好, 其次是 GMO, 油酸酰胺的抗磨损性能最差。

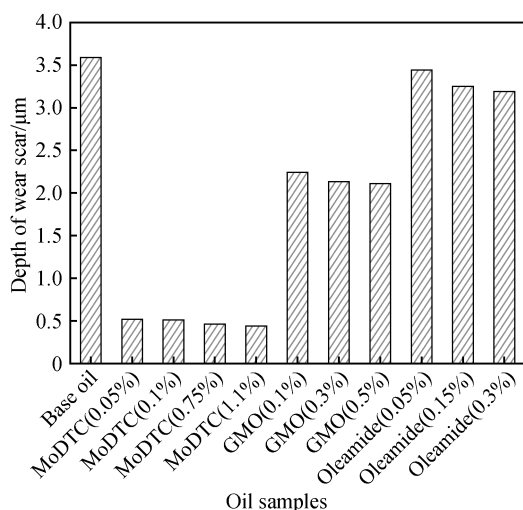


图 5 0W-16 基础油及单剂油缸套块的平均磨痕深度  
Fig.5 Average wear scar depth of cylinder liner segments of base oil 0W-16 and oil with a single friction modifier

摩擦试验的运动形式为往复滑动, 并且润滑状态处于边界润滑区, 摩擦副表面的保护膜经历破坏、生成的动态过程。MoDTC 在边界润滑条件下生成的摩擦化学反应膜具有更优的强度和吸附作用, 在往复摩

擦试验中不易被破坏, 并且在摩擦作用下, MoDTC 能够快速分解, 与裸露出来的新鲜金属表面发生化学反应, 生成保护膜, 能有效降低摩擦系数和减少磨损。GMO 和油酸酰胺在金属表面生成的物理吸附膜和化学反应膜的强度和吸附作用相对较差, 在往复摩擦试验中容易被破坏, 由于表面保护膜不能及时生成, 表现出有限的减摩和抗磨作用。

## 2.2 0W-16 全配方机油和 0W-20 参比油试验分析

### 2.2.1 0W-16 全配方机油和 0W-20 参比油组成分析

全配方机油中含有多种添加剂, 为了更好地分析 0W-16 机油的减摩性能, 通过红外光谱技术分析 0W-16 全配方汽油机油和 0W-20 参比油的官能团(见图 6), 以获悉 0W-16 机油中减摩剂组分。由图 6 可见,  $3650$ 、 $3648$ 、 $3643\ \text{cm}^{-1}$  处为游离  $-\text{OH}$  吸收峰,  $-\text{OH}$  具有极强的极性, 有利于润滑油极性添加剂分子吸附在摩擦副表面。 $1731$ 、 $1735$ 、 $1737\ \text{cm}^{-1}$  处为  $\text{C}=\text{O}$  伸缩振动峰<sup>[20]</sup>, 推测机油样品中含有酯类减摩剂。 $1514\ \text{cm}^{-1}$  处为  $\text{C}=\text{S}$  不对称伸缩振动峰,  $1228$ 、 $1233$ 、 $1234\ \text{cm}^{-1}$  处为  $\text{C}=\text{S}$  对称伸缩振动峰;  $1148$ 、 $1152$ 、 $1156\ \text{cm}^{-1}$  处为  $\text{C}-\text{N}$  伸缩振动峰;  $967$ 、 $976$ 、 $978\ \text{cm}^{-1}$  处为  $\text{Mo}=\text{O}$  特征吸收峰<sup>[21-22]</sup>, 可以推测出机油油样中有机钼减摩剂为二烷基二硫代氨基甲酸钼 MoDTC。 $1059$ 、 $1062$ 、 $1072\ \text{cm}^{-1}$  处为  $\text{P}-\text{O}-\text{C}$  伸缩振动峰,  $670$ 、 $668\ \text{cm}^{-1}$  处为  $\text{P}=\text{S}$  振动吸收峰,  $543$ 、 $539$ 、 $537\ \text{cm}^{-1}$  处为  $\text{P}-\text{S}-\text{Zn}$  振动吸收峰<sup>[23-24]</sup>, 这些结构来自极压抗磨添加剂 ZDDP。

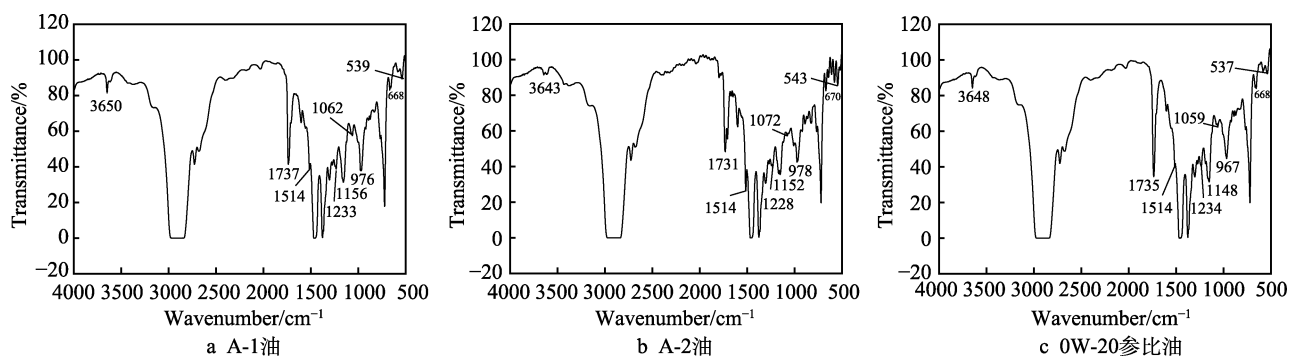


图 6 0W-16 全配方汽油机油和 0W-20 参比油红外光谱图  
Fig.6 Infrared spectrums of fully-formulated engine oil 0W-16 and reference oil 0W-20: a) oil A-1; b) oil A-2; c) reference oil 0W-20

为了进一步推测 0W-16 全配方汽油机油和 0W-20 参比油中摩擦功能剂 MoDTC 和 ZDDP 的含量, 采用油料元素光谱分析技术测定全配方机油中元素 Mo、P、Zn 含量, 结果见图 7。Mo 元素主要来自于有机钼减摩剂 MoDTC, P 元素和 Zn 元素主要来自于极压抗磨添加剂 ZDDP。从图 7 还可以看出, A-1 油、A-2 油和参比油的 P 元素和 Zn 元素含量基本相当, 表明

这 3 个油品中 ZDDP 含量在同一水平。A-1 油和 A-2 油中 Mo 含量约是参比油中 Mo 含量的 12 倍, 表明增加有机钼减摩剂的含量能够提高油品的节能性能。由于 A-1 油的台架节油率高, A-2 油的台架节油率低, 同时也表明一味提高 Mo 的含量并不能获得更好的节能性能。添加剂之间的协同作用对添加剂发挥效能具有重要影响<sup>[25-26]</sup>。

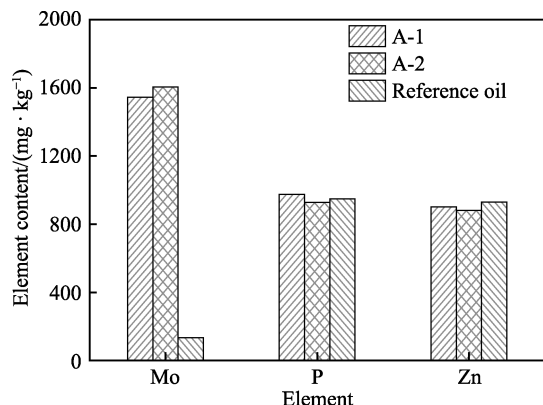


图7 0W-16全配方汽油机油和0W-20参比油元素Mo、P、Zn含量

Fig.7 Content of elements Mo, P and Zn in fully-formulated engine oil 0W-16 and reference oil 0W-20

### 2.2.2 0W-16全配方机油和0W-20参比油减摩性能分析

0W-16全配方机油和0W-20参比油在SRV缸套-活塞环试验中随温度变化的摩擦系数曲线如图8所示。为了对比, 1.1%MoDTC的单剂油样摩擦系数曲线也绘于图8中。由图8可以看出, 在摩擦试验开始后, 0W-20参比油的摩擦系数比0W-16全配方机油A-1、A-2和1.1%MoDTC单剂油样的摩擦系数高很多, 随着温度升高, 0W-20参比油摩擦系数先缓慢减小, 然后快速减小到0W-16全配方机油的摩擦系数水平。这是因为0W-20参比油中MoDTC含量较少, 当温度较低( $<60^{\circ}\text{C}$ )时, 0W-20参比油中的无灰减摩剂(如酯类减摩剂或含氮减摩剂)在竞争吸附中起主要作用, 在边界润滑区表现出较高的摩擦系数(图2b、2c也表明了这一点); 随着温度升高, 无灰减摩剂解吸附作用变强, 同时机油黏度降低, 表面粗糙峰滑动接触作用增强, MoDTC发生分解, 生成 $\text{MoS}_2$ 、 $\text{MoO}_3$ 和 $\text{FeS}$ 等反应膜, 发挥减摩作用, 摩擦系数持续降低<sup>[13-14,26]</sup>。

当试验温度较低( $40^{\circ}\text{C}$ )时, 发动机节能台架试验节油率低的A-2油与1.1%MoDTC单剂油样的摩擦系数处于同一水平, 说明在低温时, A-2油中的添加剂MoDTC起主要减摩作用。在低温区( $<60^{\circ}\text{C}$ ), 发动机节能台架试验中节油率高的A-1油与A-2油相比, 表现出更低的摩擦系数, 推测这是由于A-1油中无灰减摩剂吸附膜的减摩作用和MoDTC化学反应膜的减摩作用产生了叠加效应, 展现出更优的低温润滑性能。随着温度升高, 含1.1%MoDTC单剂油样的摩擦系数先轻微下降, 后保持平稳, 而A-1油和A-2油的摩擦系数表现出更为明显的下降趋势。这是由于油样中的添加剂MoDTC在摩擦试验过程中会产生中间产物 $\text{MoS}_{2-x}\text{O}_x$ , 对于含MoDTC的单剂油样, 中间

产物 $\text{MoS}_{2-x}\text{O}_x$ 会被进一步氧化, 生成更多的 $\text{MoO}_3$ ; 而全配方0W-16机油A-1和A-2中的添加剂ZDDP分解后产生的 $\text{S}^{2-}$ 会提供给MoDTC的中间产物 $\text{MoS}_{2-x}\text{O}_x$ , 从而生成更多的 $\text{MoS}_2$ , 抑制 $\text{MoO}_3$ 的产生, 即ZDDP促进了MoDTC的硫化反应, 抑制了它的氧化反应。此外,  $\text{MoS}_2$ 具有层状晶格结构, 晶格层之间只存在非常弱的范德华力, 表现出很低的剪切强度, 与 $\text{MoO}_3$ 反应膜相比, 更具有减摩作用。全配方0W-16机油A-1和A-2中的添加剂ZDDP与MoDTC产生协同作用, 进一步降低了摩擦系数<sup>[13-14,27-28]</sup>。

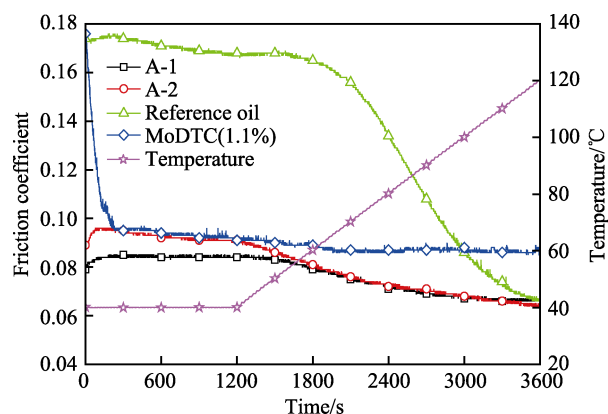


图8 0W-16全配方机油及0W-20参比油在SRV缸套-活塞环试验中的摩擦系数曲线

Fig.8 Friction coefficient curves of fully-formulated engine oil 0W-16 and reference oil 0W-20 in SRV cylinder liner/piston-ring tests

SRV缸套-活塞环摩擦试验后, 0W-16全配方机油及0W-20参比油缸套块中间位置磨痕3D形貌如图9所示(图9a中的双向箭头线表示摩擦试验中活塞环的往复运动方向)。可以看出, 缸套块上的磨痕并不明显, 磨损深度和表面粗糙度处于同一量级。通过3D光学表面轮廓仪获得的磨痕平均深度见图10。由图10可知, 发动机台架试验节油率高的A-1油的缸套块磨痕平均深度为 $0.13\mu\text{m}$ , 抗磨性最好; 发动机台架试验节油率低的A-2油的缸套块磨痕平均深度为 $0.18\mu\text{m}$ , 0W-20参比油的缸套块磨痕平均深度为 $0.21\mu\text{m}$ , 两者抗磨损能力相当。说明性能优异的低黏度机油油样A-1在接触表面产生摩擦保护膜, 与黏度较高的参比油相比, 表现出更好的抗磨损性能。在摩擦试验过程中, 0W-16全配方油样中的ZDDP能够在摩擦副表面快速生成玻璃态磷酸盐保护膜, 并且磷酸盐膜分子中Fe元素含量少, 在磷酸盐膜生成、破坏的动态过程中, 摩擦副基体材料损失较少, 表现出良好的抗磨损性能<sup>[13]</sup>。由于1.1%MoDTC单剂油样不含抗磨添加剂ZDDP, 与全配方油样相比, 磨损较为严重。



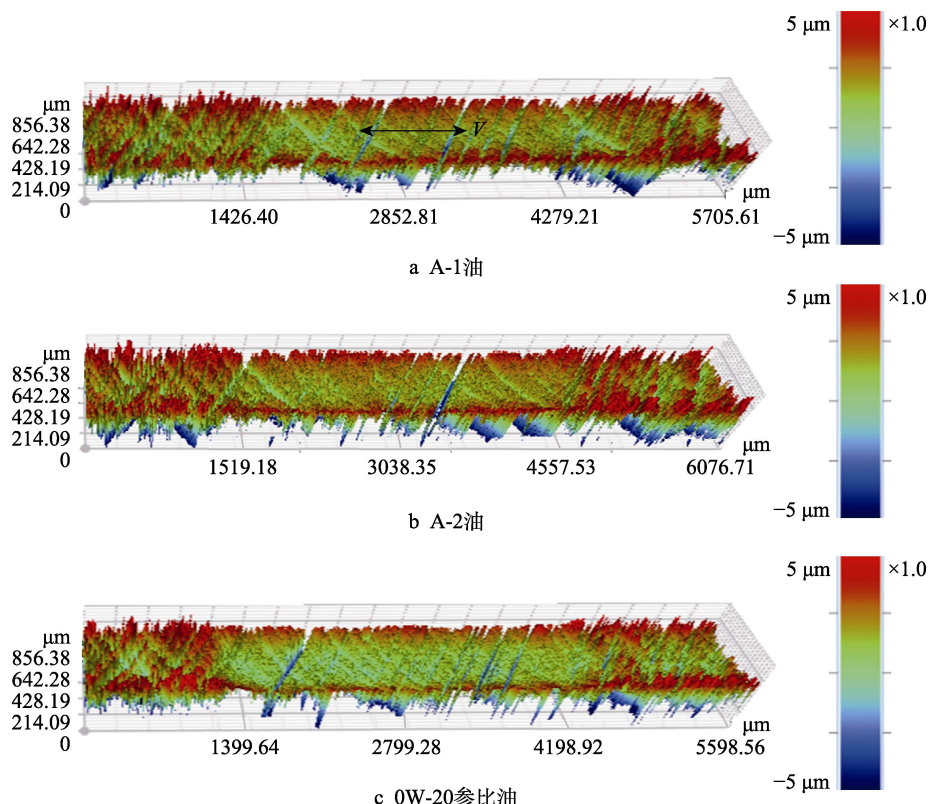


图 9 0W-16 全配方机油及 0W-20 参比油摩擦试验后缸套块磨痕 3D 形貌图

Fig.9 3D topographies of cylinder liner segments of fully-formulated engine oil 0W-16 and reference oil 0W-20 after tests: a) oil A-1; b) oil A-2; c) reference oil 0W-20

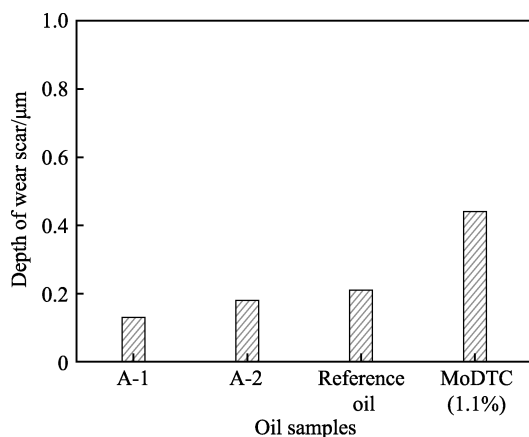


图 10 0W-16 全配方机油及 0W-20 参比油缸套块磨痕平均深度

Fig.10 Average wear scar depth of cylinder liner segments of fully-formulated engine oil 0W-16 and reference oil 0W-20

### 2.2.3 0W-16 全配方机油及 0W-20 参比油极压性能分析

0W-16 汽油机油的黏度小，形成的润滑油膜薄，极压值大的机油能够更好地保护摩擦副表面，防止油膜破裂而产生较高的摩擦阻力和磨损。0W-16 全配方机油和 0W-20 参比油的极压性能试验结果如图 11 所示。由图 11 可以看出，0W-16 机油 A-1 和 A-2 在极压载荷之前，随着载荷增大，其摩擦系数都能保持平稳；随着试验载荷继续增加，油膜破裂后，摩擦系数

急剧升高。0W-20 参比油在极压试验中，随着载荷增大，摩擦系数先下降再上升，之后油膜破裂，摩擦系数急剧升高。在整个极压试验过程中，0W-20 参比油与 0W-16 机油相比，表现出更大的摩擦系数。根据图 11 中的摩擦系数曲线，获得试验油样的极压载荷值：A-1 油的极压值最大，为 1500 N；其次是 0W-20 参比油，极压值为 1200 N；A-2 油极压值最小，为 900 N。油品的极压性能反映出油品极压添加剂的实际效应，结合图 7 可以得出，虽然机油油样中极压抗磨剂 ZDDP 含量相当，但是由于不同配方中各添加剂之间的竞争吸附和协同效应不同，导致机油油样的极压值差异较大。节油率高的 A-1 油的摩擦系数，在极压过程中表现出明显的两个阶段：在 1000 N 之前，A-1 油摩擦系数表现平稳且较小，推测这时的表面膜以 MoDTC 减摩剂反应膜为主；当载荷升到 1100 N 时，接触压力达到 MoDTC 减摩剂反应膜极限，MoDTC 反应膜发生破坏，摩擦系数上升到一个较高水平，推测这时的表面膜以 ZDDP 产生的极压油膜为主；载荷继续增加到 1600 N 时，油膜发生破裂，表明 A-1 油中的极压添加剂 ZDDP 与其他摩擦功能剂能够很好地衔接，产生良好的协同作用。在极压试验中，随着载荷增加，节油率低的 A-2 油的油膜突然破裂，发生卡咬。推测 ZDDP 在 A-2 油添加剂竞争吸附中处于弱势，当试验载荷持续增大时，未能在摩擦表面生成足够的极压油膜。



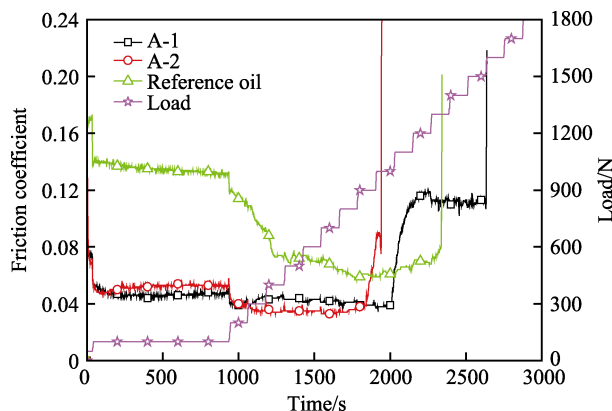


图 11 0W-16 全配方机油及 0W-20 参比油极压试验结果  
Fig.11 Results of fully-formulated engine oil 0W-16 and reference oil 0W-20 in extreme pressure test

### 3 结论

1) MoDTC 在 0W-16 基础油中的减摩和抗磨作用最好, 其次是 GMO, 油酸酰胺在 0W-16 基础油中的减摩和抗磨作用最差。

2) 对于 0W-16 汽油机油, 提高有机钼减摩剂的含量能够改善油品的节能性能, 添加剂之间的协同作用对油品节能性能产生重要影响。

3) 在摩擦润滑试验低温区 ( $<60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), 节油率高的 0W-16 机油 A-1 中的无灰减摩剂和 MoDTC 产生良好的协同作用, 表现出更优的减摩性能; 随着温度升高, 0W-16 机油 A-1 和 A-2 中的 ZDDP 能够与 MoDTC 产生协同作用, 进一步降低摩擦系数。

4) 节油率高的机油 A-1 中的 ZDDP 与其他摩擦功能剂产生良好的协同作用, 表现出更大的极压值, 能防止低黏度 0W-16 机油油膜破裂而产生较大的摩擦阻力和磨损。

### 参考文献:

- [1] 武彬. 汽油机低摩擦系统优化及其对节能影响研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2013.  
WU Bin. Study on low friction system optimization of gasoline engine and its effects on energy-saving[D]. Jilin: Jilin University, 2013.
- [2] KENNEDY M, HOPPE S, ESSER J. Piston ring coating reduces gasoline engine friction[J]. MTZ worldwide, 2012, 73(5): 40-43.
- [3] 李水云, 隋秀华. ILSAC GF-6 汽油机油规格的进展及挑战[J]. 合成润滑材料, 2015, 42(1): 28-31.  
LI Shui-yun, SUI Xiu-hua. Progress and challenges of ILSAC GF-6 gasoline engine oil specification[J]. Synthetic lubricants, 2015, 42(1): 28-31.
- [4] TANAKA H, NAGASHIMA T, SATO T, et al. The effect of 0W-20 low viscosity engine oil on fuel economy[R]. USA: SAE technical paper, 1999.
- [5] ONODERA K, WATANABE H, SATO T, et al. Fuel economy improvement by engine oil with ultra-high

- viscosity index[R]. USA: SAE technical paper, 2019.
- [6] 祝洪宇, 闻元, 林海洪, 等. ILSAC GF-6 技术规格性能分析及开发现状[J]. 润滑油, 2016, 31(1): 46-49.  
ZHU Hong-yu, WEN Yuan, LIN Hai-hong, et al. Technical specification performance analysis and development status of ILSAC GF-6[J]. Lubricating oil, 2016, 31(1): 46-49.
- [7] VENGUDUSAMY B, GREEN J H, LAMB G D, et al. Behaviour of MoDTC in DLC/DLC and DLC/steel contacts[J]. Tribology international, 2012, 54: 68-76.
- [8] ALJEBOORI Y, KOSARIEH S, OFUNE M, et al. Measuring tappet rotation in a valvetrain rig when lubricated in a fully formulated oil containing MoDTC-type friction modifier[J]. Tribology international, 2018, 121: 442-449.
- [9] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理(第三版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.  
WEN Shi-zhu, HUANG Ping. Principles of tribology (third edition)[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.
- [10] ZHU D, WANG Q J. On the  $\lambda$  ratio range of mixed lubrication[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, part J: Journal of engineering tribology, 2012, 226(12): 1010-1022.
- [11] NB/SH/T 0882—2014, 润滑油极压性能的测定 SRV 试验法[S].  
NB/SH/T 0882—2014, Determination of extreme pressure properties of lubricating oils SRV tester method[S].
- [12] GROSSIORD C, VARLOT K, MARTIN J M, et al. MoS<sub>2</sub> single sheet lubrication by molybdenum dithiocarbamate[J]. Tribology international, 1998, 31(12): 737-743.
- [13] SPIKES H. Low- and zero-sulphated ash, phosphorus and sulphur anti-wear additives for engine oils[J]. Lubrication science, 2008, 20(2): 103-136.
- [14] 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.
- [15] KANO M, YASUDA Y, OKAMOTO Y, et al. Ultralow friction of DLC in presence of glycerol mono-oleate (GNO)[J]. Tribology letters, 2005, 18(2): 245-251.
- [16] 夏鑫, 李妍, 蔺建民. 单脂脂肪酸甘油酯的润滑性能研究进展[J]. 应用化学, 2020, 49(3): 744-749.  
XIA Xin, LI Yan, LIN Jian-min. Research progress on lubrication properties of monoglycerides[J]. Applied chemical industry, 2020, 49(3): 744-749.
- [17] 夏延秋, 刘维民, 薛群基. 几种酰胺类化合物作为添加剂对钢-钢和钢-铝摩擦副摩擦学性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2002, 22(1): 40-43.  
XIA Yan-qiu, LIU Wei-min, XUE Qun-ji. Effect of several amide compounds as additives in liquid paraffin on friction and wear behavior of steel-steel and steel-aluminum alloy systems[J]. Tribology, 2002, 22(1): 40-43.
- [18] 方建华, 陈波水, 董凌, 等. 酰胺型改性菜籽油润滑添加剂对钢-钢摩擦副和钢-铝摩擦副摩擦磨损性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2005, 25(2): 145-148.  
FANG Jian-hua, CHEN Bo-shui, DONG Ling, et al. Effect of amide type modified rapeseed oil as lubricating additive on friction and wear behavior[J]. Tribology, 2005, 25(2): 145-148.

(下转第 117 页)

- [13] HE J, LAVERNIA E J. Precipitation phenomenon in nanostructured  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -NiCr coatings[J]. Materials science and engineering A, 2001, 301(1): 69-79.
- [14] LEWANDOWSKA M, KURZYDLOWSKI K J. Thermal stability of a nanostructured aluminium alloy[J]. Materials characterization, 2005, 55(4-5): 395-401.
- [15] CHUNG K, RODRIGUEZ R, LAVERNIA E, et al. Grain growth behavior of cryomilled INCONEL 625 powder during isothermal heat treatment[J]. Metallurgical and materials transactions A, 2002, 33(1): 125-134.
- [16] GHADAMI F, ZAKERI A, AGHDAM A S R, et al. Structural characteristics and high-temperature oxidation behavior of HVOF sprayed nano- $\text{CeO}_2$  reinforced NiCoCrAlY nanocomposite coatings[J]. Surface and coatings technology, 2019, 373: 7-16.
- [17] KUMAR M, SINGH H, SINGH N. Effect of increase in nano-particle addition on mechanical and microstructural behaviour of HVOF and cold-spray Ni-20Cr coatings on boiler steels[J]. Materials today: Proceedings, 2020, 21: 2035-2042.
- [18] MI P, ZHAO H, WANG T, et al. Sliding wear behavior of HVOF sprayed WC-(nano-WC-Co) coating at elevated temperatures[J]. Materials chemistry and physics, 2018, 206: 1-6.
- [19] 王铀, 刘勇, 周飞飞, 等. 热喷涂纳米结构热障涂层的高温长效服役性能研究进展[J]. 航空制造技术, 2019, 62(21): 14-21.
- WANG You, LIU Yong, ZHOU Fei-fei, et al. Research progress on high temperature and long service performance of thermal sprayed nanostructured thermal barrier coatings[J]. Aeronautical manufacturing technology, 2019, 62(21): 14-21.
- [20] MALOW T R, KOCH C C. Grain growth in nanocrystalline iron prepared by mechanical attrition[J]. Acta materialia, 1997, 45(5): 2177-2186.
- [21] LIU F, YANG G, WANG H, et al. Nano-scale grain growth kinetics[J]. Thermochimica acta, 2006, 443(2): 212-216.
- [22] MEYERS M A, MISHRA A, BENSON D J. Mechanical properties of nanocrystalline materials[J]. Progress in materials science, 2006, 51(4): 427-556.
- [23] HU W, LI M, FUKUMOTO M. Preparation and properties of HVOF NiAl nanostructured coatings[J]. Materials science and engineering: A, 2008, 478(1-2): 1-8.
- [24] LAI G Y. Factors affecting the performances of sprayed chromium carbide coatings for gas-cooled reactor heat exchangers[J]. Thin solid films, 1979, 64(2): 271-280.
- [25] ZIMMERMANN S, KREYE H. Chromium carbide coatings produced with various HVOF spray systems[C]// Thermal spray: Practical solutions for engineering problems. USA: ASM International, 1996: 147-152.
- [26] VERSTAK A, BARANOVSKI V. Deposition of carbides by activated combustion HVOF spraying[C]// Thermal solution: Advances in technology and application. Osaka: DVS-German Welding Society, 2004: 551-555.

(上接第 80 页)

- [19] HUANG W, HOU B, LIU M, et al. Improvement in tribological performances of magnesium alloy using amide compounds as lubricating additives during sliding[J]. Tribology letters, 2005, 18(4): 445-451.
- [20] 赵畅畅, 陈闽杰, 丘晖饶. 合成润滑油基础油的红外光谱分析与特征峰辨识[J]. 润滑与密封, 2013, 38(10): 102-104.
- ZHAO Chang-chang, CHEN Min-jie, QIU Hui-rao. Infrared spectrograms analysis and typical absorption peaks identification of synthetic lubricants[J]. Lubrication engineering, 2013, 38(10): 102-104.
- [21] 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.
- [22] YAN L, YUE W, WANG C B, et al. Comparing tribological behaviors of sulfur- and phosphorus-free organomolybdenum additive with ZDDP and MoDTC[J]. Tribology international, 2012, 53: 150-158.
- [23] 段庆华, 刘端. 丁二酰亚胺与 ZDDP 的相互作用及对油品分散性能的影响[J]. 石油炼制与化工, 1992(5): 64-69.
- DUAN Qing-hua, LIU Duan. The interaction between succinimide and ZDDP and the effect of ZDDP on dispersive ability of succinimide[J]. Petroleum processing and petrochemicals, 1992(5): 64-69.
- [24] 张润香, 刘功德, 曹聪蕊, 等. ZDDP 热稳定性及其对抗磨性能的影响[J]. 润滑油, 2012, 27(6): 29-34.
- ZHANG Run-xiang, LIU Gong-de, CAO Cong-rui, et al. Thermal stability of zinc dialkyldithiophosphates and its influence on antiwear performance[J]. Lubricating oil, 2012, 27(6): 29-34.
- [25] 叶红, 武志强. 内燃机油用减摩剂及其复配规律[J]. 润滑与密封, 2005, 11(6): 122-126.
- YE Hong, WU Zhi-qiang. Friction modifiers and the rules of interactions among additives used in engine oils[J]. Lubrication engineering, 2005, 11(6): 122-126.
- [26] UNNIKRISHNAN R, JAIN M C, HARINARAYAN A K, et al. Additive-additive interaction: an XPS study of the effect of ZDDP on the AW/EP characteristics of molybdenum based additives[J]. Wear, 2002, 252(3): 240-249.
- [27] DE BARROUSBOUCHET M I, MARTIN J M, LEMOGNE T, et al. Boundary lubrication mechanisms of carbon coatings by MoDTC and ZDDP additives[J]. Tribology international, 2005, 38(3): 257-264.
- [28] MORINA A, NEVILLE A. Understanding the composition and low friction tribofilm formation/removal in boundary lubrication[J]. Tribology international, 2007, 40(10): 1696-1704.