

# 短链脂肪醇开环改性环氧脂肪酸甲酯 制备润滑油基础油

卢鹏<sup>1</sup>,许世海<sup>1</sup>,王昊康<sup>1</sup>,向硕<sup>1</sup>,毕涛<sup>2</sup>,徐军雄<sup>2</sup>

(1. 陆军勤务学院,重庆 401311; 2. 69230 部队,新疆 乌苏 833000)

**摘要:**以环氧脂肪酸甲酯为原料,在磷酸催化下与短链脂肪醇开环反应制备一系列的双酯衍生物,作为矿物基基础油的替代品。研究了醇碳链长度对双酯衍生物黏度、酸值、低温流动性、热氧化稳定性等理化性能和极压性能、减摩性能、抗磨性能等摩擦学性能的影响,并探究了双酯衍生物作为基础油对传统润滑添加剂二烷基二硫代磷酸锌(ZDDP)的感受性。结果表明:采用短链脂肪醇对环氧脂肪酸甲酯进行开环改性,可以改善其低温流动性、极压性能和减摩、抗磨性能,而不能改善其热氧化稳定性;制备的双酯衍生物对传统润滑添加剂 ZDDP 具有良好的感受性。

**关键词:**环氧脂肪酸甲酯;短链脂肪醇;理化性能;摩擦学性能;ZDDP

中图分类号:TQ645;TS225

文献标识码:A

文章编号:1003-7969(2022)05-0029-06

## Lubricating oil base oil prepared by ring – opening modification of epoxy fatty acid methyl ester with short chain fatty alcohol

LU Peng<sup>1</sup>, XU Shihai<sup>1</sup>, WANG Haokang<sup>1</sup>, XIANG Shuo<sup>1</sup>, BI Tao<sup>2</sup>, XU Junxiong<sup>2</sup>

(1. Army Logistics Academy, Chongqing 401311, China; 2. Unit 69230, Wusu 833000, Xinjiang, China)

**Abstract:** With epoxy fatty acid methyl ester as raw material, under the action of phosphoric acid catalyst, epoxy fatty acid methyl ester reacted with short chain fatty alcohol to produce a series of diester derivatives, which could be used as substitutes for traditional mineral oil – based base oils. The effects of alcohol carbon chain length on the viscosity, acid value, low temperature fluidity, thermal oxidation stability, extreme pressure property, anti – friction and anti – wear properties of the diester derivatives were investigated. The susceptibility of the diester derivatives to traditional additive zinc dialkyl dithiophosphates (ZDDP) was further investigated. The results showed that when the epoxy fatty acid methyl ester was modified by short chain fatty alcohol, the low temperature fluidity, extreme pressure property, anti – friction property and anti – wear property of the diester derivatives could be improved, but the oxidation stability of the diester derivatives could not be improved. The diester derivatives had good susceptibility to ZDDP.

**Key words:** epoxy fatty acid methyl ester; short chain fatty alcohol; physiochemical property; tribological property; ZDDP

近年来,国家把固体废物污染防治摆在生态文

明建设的突出位置,“无废城市”试点建设成为重要抓手<sup>[1]</sup>。餐饮废油作为一种城市固体废物,对其开展无害化、减量化和资源化利用研究,已成为公众和政府部门越来越关注的焦点问题<sup>[2-3]</sup>。

餐饮废油中的基本组分——动植物油脂由于具有黏度指数高、润滑性能好、闪点高、挥发损失少和可生物降解等优点<sup>[4]</sup>,可以作为传统矿物基润滑油的替代品。据统计,90%以上的润滑油可以被可生

收稿日期:2021-06-08;修回日期:2021-07-03

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(51704301);

陆军勤务学院青年科研资助项目(LQ-QN-201922)

作者简介:卢鹏(1995),男,硕士研究生,研究方向为石油化工与油料应用(E-mail)786984148@qq.com。

通信作者:向硕,讲师(E-mail)xslaplace@163.com。

物降解润滑油取代<sup>[5]</sup>。然而,动植物油脂具有低温流动性差、易水解和热氧化稳定性差的缺点<sup>[6]</sup>,大大限制了其推广应用。因此,对动植物油脂进行化学改性,使其能被直接用于润滑油基础油具有重大经济效益和社会效益。目前,常用的化学改性方法有氢化<sup>[7]</sup>、酯化<sup>[8]</sup>、环氧化<sup>[9-10]</sup>、酰化<sup>[11]</sup>、烷氧基化<sup>[12-13]</sup>,或将以上的改性方法组合使用。

本文采用不同碳链长度的脂肪醇开环改性环氧脂肪酸甲酯(EFAME,以餐饮废油为原料,通过酯交换和环氧化反应制备)得到一系列双酯衍生物作为传统矿物基础油的替代品,并采用红外光谱和核磁氢谱对其结构进行表征。考察醇碳链长度对双酯衍生物黏度、酸值、低温流动性、热氧化稳定性等理化性能以及极压性能、减摩性能、抗磨性能等摩擦学性能的影响,同时考察不同添加量二烷基二硫代磷酸锌(ZDDP)作为双酯衍生物添加剂对其极压性能、减摩性能、抗磨性能等摩擦学性能的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

环氧脂肪酸甲酯,课题组前期以餐饮废油为原料,通过酯交换和环氧化两步法制备<sup>[14-15]</sup>;正丙醇、正丁醇、正戊醇、异戊醇、正己醇、磷酸,成都科龙化工试剂厂;基础油(150N),荆门石化;ZDDP,锦州百特化工有限公司。

HJ-6 磁力搅拌电热套;RE-52AA 旋转蒸发器;BZF-50 真空干燥箱;MS205DU 电子天平;Q20P 压力差示扫描量热仪,美国 TA 公司;MM-W1A 立式万能摩擦磨损试验机;S-4800 扫描电子显微镜,日本日立公司;Spectrum Two 红外光谱仪,广州西江仪器设备有限公司;Unity-Inova500 核磁共振谱仪,美国 Varian 公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 脂肪醇开环改性 EFAME 制备双酯衍生物

采用不同碳链长度的脂肪醇(正丙醇、正丁醇、正戊醇、异戊醇、正己醇)对 EFAME 进行开环改性,制备流程如下(以正己醇为例):量取 50 mL EFAME、74 mL 正己醇和 2.5 g 磷酸依次加入三颈烧瓶中,启动磁力搅拌电热套,边搅拌边升温至 100 ℃,回流反应 25 h。反应结束后,使用蒸馏水水洗除去磷酸,利用旋转蒸发器去除过量的正己醇。最后,在产物中加入无水硫酸镁,真空干燥 24 h 后,通过真空抽滤除去硫酸镁,即得双酯衍生物 JAD<sup>[16]</sup>。由正丙醇、正丁醇、正戊醇、异戊醇制得的双酯衍生物分别为 BAD、DAD、WAD、i-WAD。

#### 1.2.2 双酯衍生物的表征

利用红外光谱和核磁氢谱对 EFAME 及双酯衍生物进行表征。

#### 1.2.3 理化性能测试

根据 GB/T 265—1988、GB/T 1995—1998、GB/T 1668—2008、GB/T 3535—2006 方法,分别测定双酯衍生物的运动黏度、黏度指数、酸值和倾点。

采用压力差示扫描量热仪测定双酯衍生物的热氧化稳定性,实验主要测定起始氧化温度(OT)和最快氧化温度(SM)。测试条件:初始温度 40 ℃,升温速率 10 ℃/min,最高温度 250 ℃。

#### 1.2.4 摩擦学性能测试

根据 GB/T 3142—2019 方法,对双酯衍生物的极压性能进行评定。采用 MM-W1A 立式万能摩擦磨损试验机测试双酯衍生物的抗磨、减摩性能,测试条件:不同载荷(100、200、400 N),转速 1 200 r/min,室温,时间 30 min。采用扫描电子显微镜(SEM)对磨斑表面形貌进行表征,观察载荷 400 N、转速 1 200 r/min、室温、时间 30 min 条件下的磨斑形貌。

## 2 结果与讨论

### 2.1 EFAME 与双酯衍生物的表征

#### 2.1.1 红外光谱分析

图 1 为 EFAME 与双酯衍生物 JAD 的红外光谱图。

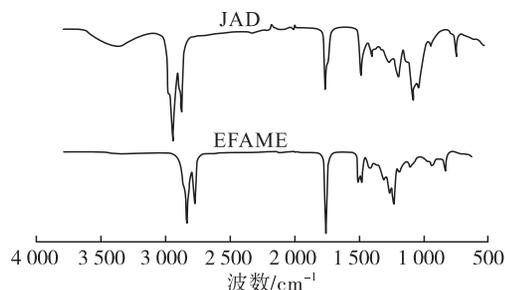


图 1 EFAME 与双酯衍生物 JAD 的红外光谱图

由图 1 可知,EFAME 各峰中 723  $\text{cm}^{-1}$  为  $\text{CH}_2$  面外弯曲振动,1 113  $\text{cm}^{-1}$  为醚基  $\text{C}-\text{O}-\text{C}$  对称伸缩振动,1 169、1 246、1 196  $\text{cm}^{-1}$  为酯基  $-\text{COO}-$  伸缩振动,1 362  $\text{cm}^{-1}$  为  $\text{CH}_3$  对称弯曲振动,1 462  $\text{cm}^{-1}$  为  $\text{CH}_2$  弯曲振动,1 739  $\text{cm}^{-1}$  为  $\text{CH}_2$  羰基  $\text{C}=\text{O}$  伸缩振动,2 922  $\text{cm}^{-1}$  和 2 853  $\text{cm}^{-1}$  为  $\text{CH}_3$  弯曲振动。JAD 各峰中 724.36  $\text{cm}^{-1}$  为  $\text{CH}_2$  面外弯曲振动,1 057.19  $\text{cm}^{-1}$  为  $\text{C}-\text{OH}$  伯醇伸缩振动,1 245.85、1 174.63  $\text{cm}^{-1}$  为酯基  $-\text{COO}-$  伸缩振动,1 378.16  $\text{cm}^{-1}$  为  $\text{CH}_3$  对称弯曲振动,1 464.97  $\text{cm}^{-1}$  为  $\text{CH}_2$  弯

曲振动,  $1\ 737.56\ \text{cm}^{-1}$  为  $\text{CH}_2$  羰基  $\text{C}=\text{O}$  伸缩振动,  $2\ 924.53\ \text{cm}^{-1}$  和  $2\ 855.15\ \text{cm}^{-1}$  为  $\text{CH}_2$  羰基  $\text{C}=\text{O}$  伸缩振动,  $3\ 355.19\ \text{cm}^{-1}$  为  $-\text{OH}$  伸缩振动。对比分析 EFAME 和 JAD 的红外光谱图可知, 开环改性后, 在  $3\ 355.19\ \text{cm}^{-1}$  出现了化学键  $-\text{OH}$  峰,  $1\ 057.19\ \text{cm}^{-1}$  出现了伯醇峰, 而  $1\ 737.56\ \text{cm}^{-1}$  处的  $\text{CH}_2$  羰基  $\text{C}=\text{O}$  峰明显降低, 据此判断开环产物已经生成。

### 2.1.2 核磁氢谱分析

图2为 EFAME 与双酯衍生物 JAD 的核磁氢谱图。

由图2可以看出, EFAME 各峰中  $0.9\delta$  (3H) 为  $-\text{CH}_3$ ,  $1.3\delta$  (20H) 为  $-\text{CH}_2$ ,  $1.5\delta$  (4H) 为  $-\text{CH}_2\text{CH}(\text{O})\text{CHCH}_2-$ ,  $1.6\delta$  (2H) 为  $-\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CO}_2\text{CH}_3$ ,  $2.3\delta$  (2H) 为  $-\text{CH}_2\text{CO}_2\text{CH}_3$ ,  $2.9\delta$  (2H) 为  $-\text{CH}(\text{O})\text{CH}-$ 。JAD 各峰中  $0.9\delta$  为  $-\text{CH}_3$  和  $-\text{OH}$  稀溶液,  $1.3\delta$  为  $-\text{CH}_2$ ,  $1.5\delta$  为  $-\text{CH}_2\text{CH}(\text{O})\text{CHCH}_2-$ ,  $1.6\delta$  为  $-\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CO}_2\text{CH}_3$ ,  $2.3\delta$  为  $-\text{CH}_2\text{CO}_2\text{CH}_3$ ,  $2.9\delta$  为  $-\text{CH}(\text{O})\text{CH}-$ ,  $4.1\delta$  为  $-\text{OH}$  浓溶液。对比分析

EFAME 和 JAD 的核磁氢谱图发现, 开环改性后, 在  $0.9\delta$  处的峰明显增高, 这是由于开环反应产生了  $-\text{OH}$  和  $-\text{CH}_3$ , 并且在  $4.1\delta$  处出现了  $-\text{OH}$  浓溶液的峰。

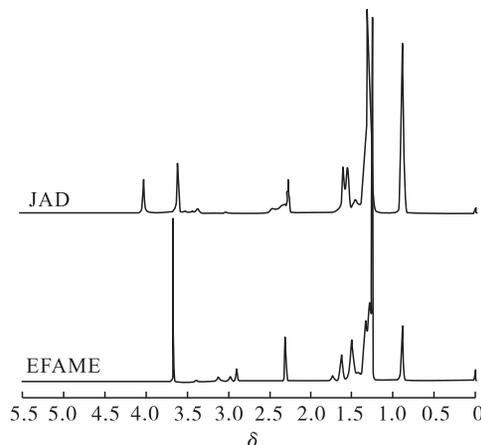


图2 EFAME 与双酯衍生物 JAD 的核磁氢谱图

## 2.2 醇碳链长度对双酯衍生物理化性能的影响

醇碳链长度对双酯衍生物黏度、酸值、低温流动性、热氧化稳定性等理化性能的影响如表1所示。

表1 醇碳链长度对双酯衍生物理化性能的影响

| 样品    | 运动黏度/( $\text{mm}^2/\text{s}$ ) |                        | 黏度指数 | 酸值(KOH)/<br>( $\text{mg}/\text{g}$ ) | 倾点/ $^{\circ}\text{C}$ | OT/ $^{\circ}\text{C}$ | SM/ $^{\circ}\text{C}$ |
|-------|---------------------------------|------------------------|------|--------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|       | 40 $^{\circ}\text{C}$           | 100 $^{\circ}\text{C}$ |      |                                      |                        |                        |                        |
| EFAME | 8.80                            | 2.50                   | 111  | 0.99                                 | 8.5                    | 164                    | 181                    |
| BAD   | 19.58                           | 3.93                   | 90   | 1.23                                 | 8                      | 179                    | 211                    |
| DAD   | 20.90                           | 4.12                   | 94   | 0.89                                 | 2                      | 174                    | 198                    |
| WAD   | 22.58                           | 4.37                   | 101  | 0.79                                 | -5                     | 172                    | 194                    |
| i-WAD | 24.17                           | 4.56                   | 102  | 0.46                                 | -12                    | 169                    | 192                    |
| JAD   | 25.28                           | 4.91                   | 119  | 0.26                                 | -10                    | 168                    | 188                    |
| 150N  | 29.40                           | 5.20                   | 107  | 0.10                                 | -9                     | 195                    | 216                    |

由表1可知, 随着醇碳链长度的增加, 双酯衍生物的运动黏度上升, 酸值、倾点、起始氧化温度和最快氧化温度都相应降低。运动黏度的上升可能是由于相对分子质量的增加和支链的引入改变了原有分子结构<sup>[17]</sup>; 倾点的下降可能是因为在环氧键处引入适当碳链长度的烷基基团, 可有效阻止分子堆积缠绕形成大分子结晶体<sup>[18]</sup>。另外, 起始氧化温度和最快氧化温度的下降可能是由于较长的侧链易受攻击, 发生热分解<sup>[19]</sup>。

因此, 采用脂肪醇开环改性 EFAME 可以明显改善其低温性能, 双酯衍生物 JAD、i-WAD 低温性能与 150N 相当。

## 2.3 醇碳链长度对双酯衍生物摩擦学性能的影响

### 2.3.1 极压性能

图3为醇碳链长度对双酯衍生物润滑下钢球  $P_B$  值的影响。

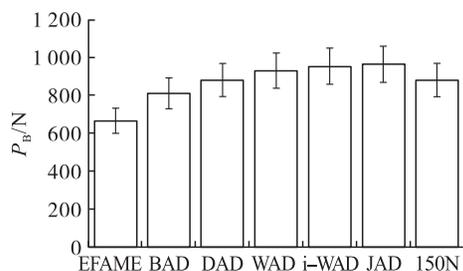


图3 醇碳链长度对双酯衍生物润滑下钢球  $P_B$  值的影响

由图3可知, 所有双酯衍生物的  $P_B$  值均高于 EFAME, 且双酯衍生物的  $P_B$  值随醇碳链长度的增加而增大。这是由于双酯衍生物作为一种酯类油, 其酯基为极性基团吸附于金属表面, 而长碳链为非极性基团留在基础油中。因此, 酯类油在金属表面的吸附膜随碳链长度的增加而增厚, 有利于提高其极压性能<sup>[20]</sup>。

### 2.3.2 减摩性能

图4为醇碳链长度对双酯衍生物润滑下钢球摩擦系数的影响。

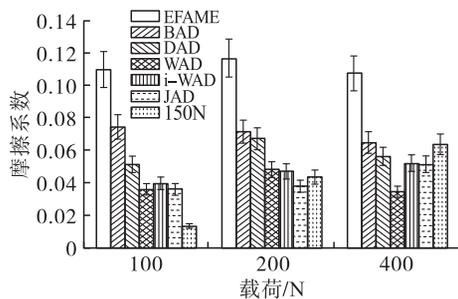


图4 醇碳链长度对双酯衍生物润滑下钢球摩擦系数的影响

由图4可知,在不同载荷下,随着醇碳链长度的增加,双酯衍生物的摩擦系数总体呈先降低后增加的趋势,且双酯衍生物的摩擦系数均较EFAME有所降低,这表明开环改性对提高减摩性能有一定的作用。当载荷从100 N增加到200 N时,摩擦系数会相应地增加,这可能是由于载荷的增加导致温度上升,致使金属表面的吸附膜被破坏;当载荷从200 N增加到400 N时,部分样品的摩擦系数降低,这可能是金属表面在高温下生成了润滑性能更好的反应膜<sup>[21-22]</sup>。

### 2.3.3 抗磨性能

图5为醇碳链长度对双酯衍生物润滑下钢球磨斑直径的影响。

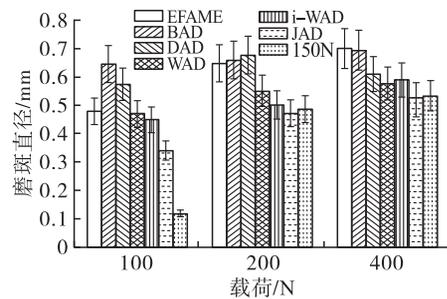


图5 醇碳链长度对双酯衍生物润滑下钢球磨斑直径的影响

由图5可知,随着载荷的增大,磨斑直径也会相应增大。在同一载荷下,磨斑直径总体随醇碳链长度的增加而减小,这可能是因为双酯衍生物的运动黏度随相对分子质量的增加而增大,导致吸附在金属表面的油膜厚度增加,从而提高了其抗磨性能<sup>[23-24]</sup>。

### 2.3.4 钢球磨斑表面形貌

为了更直观地分析双酯衍生物润滑下钢球的抗磨性能,利用SEM对其磨斑形貌进行观察,结果见图6。

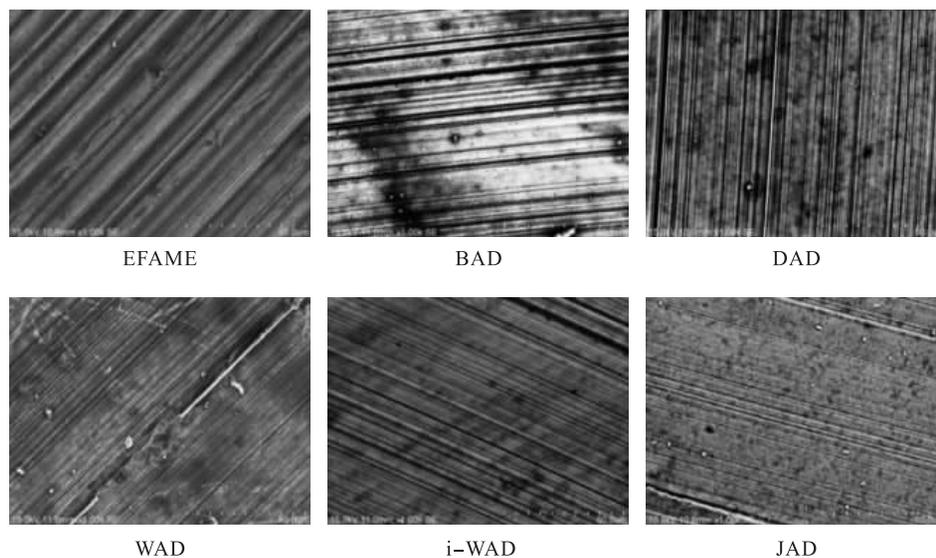


图6 双酯衍生物润滑下钢球磨斑 SEM 形貌(1 000 ×)

由图6可知,EFAME 润滑下钢球磨斑表面有较多划痕且犁沟较深,而双酯衍生物润滑下钢球表面划痕较浅且未现明显的犁沟,平滑度较EFAME有所提升。

### 2.4 双酯衍生物 JAD 对 ZDDP 的感受性

ZDDP 是有机金属盐类的极压抗磨剂,具有抗氧化、抗磨和抗腐蚀等作用,被广泛应用于内燃机油、抗磨液压油、齿轮油、轴承油、导轨油及金属加工

液等<sup>[25]</sup>。双酯衍生物作为一种新型的酯类油,开展双酯衍生物对传统极压抗磨剂 ZDDP 的感受性研究,对推广其应用具有重要意义。

以双酯衍生物 JAD 为基础油,分别将 0、0.5%、1.0%、1.5% 的 ZDDP 加入到 JAD 中,考察其极压、减摩、抗磨性能。

#### 2.4.1 极压性能

图7为不同添加量 ZDDP 对 JAD 极压性能的影响

响。由图7可知,JAD中添加0.5%、1.0%、1.5% ZDDP后 $P_B$ 值分别提高5.87%、11.75%、11.75%。

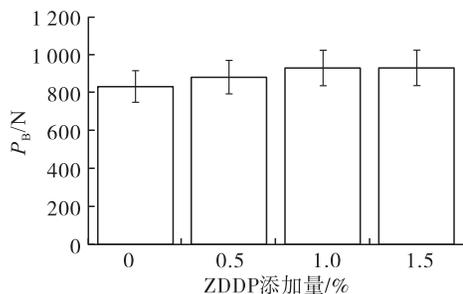


图7 不同添加量 ZDDP 对 JAD 极压性能的影响

#### 2.4.2 减摩性能

图8为不同添加量 ZDDP 对 JAD 减摩性能的影响。

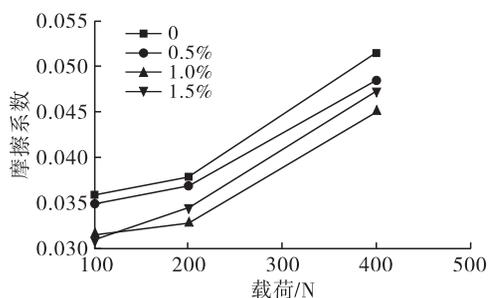


图8 不同添加量 ZDDP 对 JAD 减摩性能的影响

由图8可知,在不同载荷下,不同添加量的 ZDDP 均能减小 JAD 的摩擦系数,其中 400 N 载荷下的减摩效果最明显。在 400 N 载荷下,JAD 中添加 0.5%、1.0%、1.5% ZDDP 后摩擦系数分别减小了 5.83%、12.62%、8.15%。

#### 2.4.3 抗磨性能

图9为不同添加量 ZDDP 对 JAD 抗磨性能的影响。

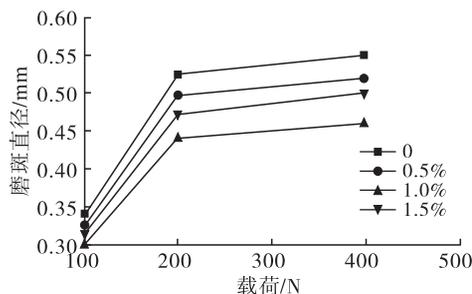


图9 不同添加量 ZDDP 对 JAD 抗磨性能的影响

由图9可知,在不同载荷下,不同添加量 ZDDP 均能减小 JAD 的磨斑直径,其中 400 N 载荷下的抗磨效果最明显。在 400 N 载荷下,JAD 中添加 0.5%、1.0%、1.5% ZDDP 后磨斑直径分别减小了 5.45%、16.36%、9.09%。

综上,实验表明 JAD 对传统极压抗磨剂 ZDDP 具有良好的感受性。

### 3 结论

(1)采用短链脂肪醇对环氧脂肪酸甲酯进行开环改性可以提高其低温流动性,但不能改善其热氧化稳定性。随着醇碳链长度的增加,双酯衍生物的运动黏度上升,酸值、倾点、起始氧化温度和最快氧化温度降低。

(2)采用短链脂肪醇对环氧脂肪酸甲酯进行开环改性可以提高其极压性能和抗磨、减摩性能。随着醇碳链长度的增加,双酯衍生物的极压性能增大,摩擦系数先减小后增大,磨斑直径减小。

(3)双酯衍生物 JAD 中添加 1.0% ZDDP 后极压性能最高提升了 11.75%,摩擦系数最高减小了 12.62%,磨斑直径最高减小了 16.36%。表明 JAD 对传统极压抗磨剂 ZDDP 具有良好的感受性。

### 参考文献:

- [1] 李金惠,卓玥雯.“无废城市”理念助推可持续发展[J]. 环境保护,2019,47(9):9-13.
- [2] 叶志成,张璇.城市垃圾渗滤液处理现状与展望[J]. 自然科学,2021,9(1):18-25.
- [3] 纪栋,苏有勇,徐天宇,等.餐厨废油和醇/酮添加物共裂化制备生物基燃料油[J]. 中国油脂,2021,46(2):60-66.
- [4] MD I M, HAENG M C. A review on characteristics, advantages and limitations of palm oil biofuel[J]. Int J Global Warm,2018,14(1):81-96.
- [5] CHOWDHURY A, MITRA D, BISWAS D. Biolubricant synthesis from waste cooking oil via enzymatic hydrolysis followed by chemical esterification[J]. J Chem Technol Biotechnol,2013,88:139-144.
- [6] MOSER B R, ERHAN S Z. Preparation and evaluation of aseries of  $\alpha$ -hydroxy ethers from 9,10-epoxystearates[J]. Eur J Lipid Sci Technol, 2007,109:206-213.
- [7] 王立琦,李中宾,刘芳,等.纳米镍的制备及氢化大豆油的分析[J]. 食品科学,2018,39(2):8-13.
- [8] GANDHI S S, GOGATE P R. Process intensification of fatty acid ester production using esterification followed by transesterification of high acid value mahua (Iluppai ennai) oil: comparison of the ultrasonic reactors[J/OL]. Fuel, 2021, 294(15):120560[2021-06-01]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S00162361214361>.
- [9] QI H F, ZHANG L L, YANG J Y, et al. Highly efficient Co single-atom catalyst for epoxidation of plant oils[J/OL]. J Chem Phys,2021,154(13):131103[2021-06-01]. <https://www.researchgate.net/publication/3505745>.

- [10] BASHIRI S, GHOBADIAN B, SOUFI M D, et al. Chemical modification of sunflower waste cooking oil for biolubricant production through epoxidation reaction[J]. *Mat Sci Eng Technol*, 2021(7):119–127.
- [11] SMITH P C, NGOTHAI Y, NGUYEN Q D, et al. The addition of alkoxy side – chains to biodiesel and the impact on flow properties [J]. *Fuel*, 2010, 89: 3517 – 3522.
- [12] CAMPANELLA A, RUSTOY E, BALDESSARI A, et al. Lubricants from chemically modified vegetable oils[J]. *Bioresour Technol*, 2010, 101:245–254.
- [13] DODANGEH F, SEYED DORRAJI M S, RASOULIFARD M H, et al. Synthesis and characterization of alkoxy silane modified polyurethane wood adhesive based on epoxidized soybean oil polyester polyol [J/OL]. *Compos Part B – Eng*, 2020, 187:107857 [2021–06–01]. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107857>.
- [14] 吴辉平,姜嵩,许筠芸,等. 菜籽油环氧化制备润滑油基础油的研究[J]. *高校化学工程学报*, 2009, 23(1): 116–121.
- [15] 刘先杰,陈立功,曹书翰,等. 餐饮废油制取脂肪酸二乙醇酰胺的研究[J]. *中国油脂*, 2013, 38(9): 55–59.
- [16] 胡小梅,袁赞,张必弦,等. 双核酸性离子液体催化餐饮废油制备生物柴油的研究[J]. *中国油脂*, 2014, 39(11):57–60.
- [17] 宋春侠,张智华,刘颖荣,等. 润滑油基础油分子结构与黏度指数构效关系研究[J]. *石油炼制与化工*, 2020, 51(6):1–5.
- [18] XIANG S, CHEN L, XU L, et al. Diester derivatives from chemically modified waste cooking oil as substitute for petroleum based lubricating oils [J]. *China Petrol Process Petrochem Technol*, 2015(2):79–86.
- [19] XIANG S, CHEN L G, YANG X, et al. Physicochemical and tribological properties of triester derivatives from chemically modified waste cooking oil[J]. *Biotechnology*, 2015, 14(1):1–8.
- [20] 温珊,吕涯. 碳酸甘油酯脂肪酸酯润滑油的制备和性能研究[J]. *润滑与密封*, 2020, 45(9):102–107.
- [21] 雷照,李旭,田成光,等. 磷酸酯润滑油添加剂的合成及摩擦学性能[J]. *应用化工*, 2020, 49(11):2683–2687,2692.
- [22] 张永江,曹阳,马雄位,等. 改性蒙脱石微粒在润滑油中分散稳定性对其摩擦学性能的影响[J]. *润滑与密封*, 2020, 45(5):36–42.
- [23] 刘宣池,管述哲,董孝宇,等. 嵌入式 PVL 改性 TMT 润滑油基础油合成及摩擦学性能[J]. *表面技术*, 2020, 49(10):198–204.
- [24] 杜鹏飞,陈国需,宋世远,等. 白云母微粉作为润滑脂添加剂的摩擦学性能[J]. *硅酸盐学报*, 2016, 44(5):748–753.
- [25] 于强亮,蔡美荣,周峰,等. 油溶性有机减摩抗磨添加剂的研究进展[J]. *表面技术*, 2020, 49(9):1–18.
- (上接第 22 页)
- [57] KURVINEN J P, SJÖVALL O, KALLIO H. Molecular weight distribution and regioisomeric structure of triacylglycerols in some common human milk substitutes [J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2002, 79(1):13–22.
- [58] ZOU X Q, HUANG J H, JIN Q Z, et al. Lipid composition analysis of milk fats from different mammalian species: potential for use as human milk fat substitutes [J]. *J Agric Food Chem*, 2013, 61(29):7070–7080.
- [59] NAGAI T, KINOSHITA T, KASAMATSU E, et al. Simultaneous separation of triacylglycerol enantiomers and positional isomers by chiral high performance liquid chromatography coupled with mass spectrometry [J]. *J Oleo Sci*, 2019, 68(10):1019–1026.
- [60] 张兰威,陈玉洁. 一种 HPLC – APCI/MS 检测母乳中 *rac* – OPL 对映异构体的方法: CN/11665299A [P]. 2020–09–15.
- [61] CHEN Y J, ZHOU X H, HAN B, et al. Regioisomeric and enantiomeric analysis of primary triglycerides in human milk by silver ion and chiral HPLC APCI – MS [J]. *J Dairy Sci*, 2020, 103(9):7761–7774.
- [62] ARSLAN F N, KARA H. Central composite design and response surface methodology for the optimization of Ag<sup>+</sup> – HPLC/ELSD method for triglyceride profiling[J]. *J Food Meas Charact*, 2017, 11(2):902–912.
- [63] ŘEZANKA T, SIGLER K. Separation of enantiomeric triacylglycerols by chiral – phase HPLC [J]. *Lipids*, 2014, 49(12):1251–1260.
- [64] TARVAINEN M, KALLIO H, YANG B R. Regiospecific analysis of triacylglycerols by ultrahigh – performance – liquid chromatography – electrospray ionization – tandem mass spectrometry [J]. *J Anal Chem*, 2019, 91(21):13695–13702.