

二聚酸抗磨剂对航空煤油润滑性的影响

张雁玲, 王姝凡, 王宜迪, 杨卫亚, 李澜鹏, 曹长海

(中国石油化工股份有限公司 大连石油化工研究院, 辽宁 大连 116000)

摘要:为考察二聚酸抗磨剂对加氢精制航空煤油润滑性的改善作用,同时验证不同二聚酸抗磨剂的改善效果,分别采用桐油、棉籽油及妥尔油酸为原料进行了二聚酸的合成与精制,利用液相色谱仪、红外光谱仪、核磁共振波谱仪等验证了桐油基、棉籽油基及妥尔油酸基二聚酸的分子结构,采用球柱润滑性测定仪(BOCLE)法和高频往复试验机(HFRR)法考察了3种不同原料来源的二聚酸对航空煤油润滑性的改善作用,用显微镜分析试验球的磨痕形貌,并提出抗磨机制。结果表明:随着二聚酸添加量的不断增大,磨痕直径、表面划痕及深度不断减小;在BOCLE法中,当二聚酸添加量为20 mg/L时,3种二聚酸均可使航空煤油润滑性磨痕直径从0.92 mm降到0.65 mm以下,满足GB 6537—2018《3号喷气燃料》要求;在HFRR法中,当二聚酸添加量为50 mg/L时,3种二聚酸均可使润滑性磨痕直径降到550 μm 以下,平均摩擦系数降到0.265以下,平均成膜率达到24%以上,且平均摩擦系数和平均成膜率的变化规律与二聚酸对航空煤油润滑性改善规律一致;制备的二聚酸均具有长碳链和羧基官能团,羧基通过强电负性吸附在金属表面,羧基之间的氢键以及非极性端通过范德华力等使二聚酸分子形成平行分子簇,进而在金属表面形成有效的润滑膜,阻止两摩擦副之间发生直接接触与摩擦。综上,3种二聚酸的润滑能力相当,均显示出良好的润滑性能。

关键词:二聚酸;航空煤油;润滑性;磨痕直径

中图分类号:TH117.2;TQ517.4 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2023)04-0063-06

Effects of dimer acid antiwear agent on lubricity of jet fuel

ZHANG Yanling, WANG Shufan, WANG Yidi, YANG Weiya,
LI Lanpeng, CAO Changhai

(SINOPEC Dalian Research Institute of Petroleum and Petrochemicals Co., Ltd., Dalian 116000, Liaoning, China)

Abstract: In order to investigate the improvement of lubricity of dimer acid antiwear agents on jet fuel and verify the improvement effects of different dimer acids antiwear agents, dimer acids were synthesized and refined from tung oil, cottonseed oil and tall oil fatty acids, respectively, and their molecular structures were verified by liquid chromatography, FT-IR spectrometer and NMR spectrometer. The effects of cottonseed oil-based dimer acid, tung oil-based dimer acid and tall oil fatty acids-based dimer acid on the lubricity of jet fuel were investigated by BOCLE and HFRR tests. The wear scar morphology of the test ball was analyzed by measuring microscope and the antiwear mechanism was proposed. The results showed that with the increase of the dosage of dimer acid, the wear scar diameter, surface scratch and depth decreased. In BOCLE test, 20 mg/L dosage of dimer acids from three different raw materials could reduce the wear scar diameter of jet fuel from 0.92 mm to less than 0.65 mm, meeting the requirement of

GB 6537-2018 No. 3 jet fuel. In HFRR test, when the dosage of three dimer acids was 50 mg/L, the wear scar diameter of lubricity and the average friction coefficient could be reduced below 550 μm and 0.265 respectively, and the average film formation rate could reach above 24%. The variation of the average friction coefficient and

收稿日期:2022-02-22;修回日期:2022-12-22

基金项目:中国石油化工集团公司资助项目“航空燃料抗磨添加剂制备技术研究”(117019-3)

作者简介:张雁玲(1986),女,副研究员,硕士,研究方向为油品分析与研究(E-mail)zhangyanling.fshy@sinopec.com。

通信作者:曹长海,副研究员(E-mail)caochanghai.fshy@sinopec.com。

average film formation rate was consistent with the improvement rule of dimer acid on the lubricity of jet fuel. The dimer acids prepared had long carbon chains and carboxyl functional groups. The carboxyl group was adsorbed on the metal surface through strong electronegativity, the hydrogen bond with carboxyl groups and the non-polar end through Van Der Waals force made the dimer acid molecules form parallel molecular clusters, and then formed an effective lubrication film on the metal surface to prevent direct contact and friction between the two friction pairs. In conclusion, the three dimer acids have the uniform lubrication ability, and show good lubrication performance.

Key words: dimer acid; jet fuel; lubricity; wear scar diameter

航空煤油的润滑性也被称为抗磨性,该性能对燃料泵使用寿命乃至飞机飞行安全均极为重要。在飞机发动机燃料供给系统和燃料控制单元中,供应燃料的柱塞泵是靠燃料来润滑的运动部件,若柱塞泵磨损,泵流速下降,最严重时可能造成发动机空中停车^[1-2]。我国改善航空煤油润滑性所采取的措施是改进飞机油泵材质、改进航空燃料的精制工艺以及加入少量的抗磨剂。目前国内普遍采用添加环烷酸类抗磨剂(如 T303 和 T302)的方法来改善航空煤油的润滑性。T303 抗磨剂现称 T1601 抗磨剂,该添加剂含磷,使用受到限制。T302 抗磨剂现称 T1602 抗磨剂,主要成分为石油基环烷酸,该添加剂来源广,与其他添加剂配伍性好,但酸性强,对发动机的燃料供给系统和燃料控制单元存在潜在的腐蚀风险,且一旦接触碱液,润滑作用迅速减弱^[3-5]。我国航空器适航审定司于 2015 年发布关于规范使用 3 号喷气燃料添加剂的通知,限制了环烷酸类抗磨剂的使用。

二聚酸是指由 2 个十八碳不饱和脂肪酸聚合得到的二聚体,其相对分子质量适中,分子中既有长的非极性碳链,又有极性的羧基,可吸附于金属表面形成润滑性保护膜,减少金属间的摩擦损伤^[6]。发达国家航空涡轮燃料所用抗磨剂的主要成分为二聚酸。目前妥尔油酸、棉籽油、大豆油等是生产二聚酸的主要原料,它们的主要成分是油酸和亚油酸,经聚合后得到二聚酸及多聚酸混合物,通过复配后可用作航空煤油抗磨剂^[7-8]。适宜的二聚酸添加量可有效改善航空燃料的润滑性能^[9-10]。二聚酸添加量过低对航空燃料的润滑性没有明显改善效果,二聚酸添加量过高又会影响航空燃料的冰点、水分离指数、防锈蚀性能等指标。此外,制备二聚酸的原料以及制备工艺的不同,也会使二聚酸对航空燃料润滑性的改善效果不同。目前我国二聚酸的生产还处在初级阶段,品种少、纯度低、质量不稳定、生产水平较低,且国内关于二聚酸作为航空煤油抗磨剂的研究较少。本文采用红外光谱、核磁共振波谱等表征手

段对桐油基、棉籽油基及妥尔油酸基二聚酸的分子结构进行解析并提出抗磨机制;采用球柱润滑性评定仪法和高频往复试验机法分别考察了生物基二聚酸在航空煤油中的摩擦学性能以及对润滑性的增进作用,以期对二聚酸型航空煤油抗磨剂的发展提供基础数据和理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 原料与试剂

桐油,武汉志晟科技有限公司;棉籽油,江西环球天然香料有限公司;妥尔油酸 ALTAPYNE L-1A,美国 Ingeity 公司;加氢精制航空煤油,由中国石化大连石油化工研究院提供,其基础物性见表 1。

碳酸锂、叔丁基对苯二酚、无水乙醇和石油醚等均为分析纯。

表 1 加氢精制航空煤油基础物性

项目	指标	项目	指标
冰点/°C	-58.0	馏程/°C	
闪点/°C	50.0	初馏点	155.1
密度/(kg/m ³)	786.0	10%回收温度	171.0
黏度/(mm ² /s)	1.628	20%回收温度	177.5
酸值(KOH)/(mg/g)	0.008	50%回收温度	191.2
总硫含量/(mg/kg)	3.7	90%回收温度	220.3
磨痕直径/mm	0.92	终馏点	242.3
银片腐蚀(级)	1		

1.1.2 仪器与设备

GC-2010 型气相色谱仪;UIC KDL1 分子蒸馏仪;Agilent 1260 Infinity II 液相色谱仪;Nicolet 6700 傅里叶变换红外光谱仪,赛默飞世尔公司;Avance III 型 500 MHz 核磁共振波谱仪,德国 Bruker 公司;G20S 型电位滴定仪,梅特勒-托利多公司;ML7100 金相显微镜。

1.2 试验方法

1.2.1 原料脂肪酸组成分析

原料油首先参照 GB/T 17376—2008 进行甲酯

化,再采用气相色谱法分析脂肪酸组成。气相色谱条件:Agilent GC-2010型气相色谱仪(配FID检测器);SP-2560型毛细管色谱柱(100 m×0.25 mm×0.20 μm);进样口温度280℃;进样量1 μL;分流进样,分流比200:1;柱初温180℃,以8℃/min升温至290℃,保持5 min;检测器温度280℃。以脂肪酸甲酯标准品定性,采用峰面积归一化法定量。

1.2.2 二聚酸的制备

桐油和棉籽油参照文献[11]先通过皂化酸解法制备对应的桐油脂肪酸和棉籽油脂肪酸,再在180~250℃、一定催化剂和催化助剂条件下经加成反应得到二聚酸粗品,而妥尔油酸直接经加成反应得到二聚酸粗品。然后采用分子蒸馏仪对二聚酸粗品进行二级分子蒸馏,分别去除未反应的单酸、三聚酸及多聚酸,得到精制二聚酸。

1.2.3 二聚酸理化性质表征

1.2.3.1 纯度测定

采用液相色谱法测定反应产物中二聚酸的含量。液相色谱条件:Agilent 1260 Infinity II液相色谱仪(配示差检测器);Plgel 3 μm MIXED-E色谱柱(300 mm×7.5 mm);流动相为四氢呋喃,流速1 mL/min;进样量10 μL。采用面积归一化法进行定量分析。

1.2.3.2 红外光谱测试

采用Nicolet 6700傅里叶变换红外光谱仪测定样品的红外光谱。采用溴化钾涂膜法制备样品,测定条件:光谱扫描次数256次,分辨率4 cm⁻¹,光谱采集范围400~4 000 cm⁻¹,检测器DTGS。

1.2.3.3 核磁共振波谱测试

采用Avance III型500 MHz核磁共振波谱仪进行核磁共振(NMR)分析。测定条件:测试温度26.85℃,谱宽10 000 Hz,脉冲宽度10 μs,扫描次数64次,核磁共振频率500.183 MHz,采样时间3.28 s,延迟时间10 s,氘代氯仿锁场。

1.2.3.4 酸值测定

准确称取一定量的二聚酸产品,溶解于40 mL乙醇中,以0.5 mol/L的氢氧化钾-乙醇标准溶液为滴定液,采用G20S型电位滴定仪测定酸值。

1.2.4 润滑性测试

1.2.4.1 球柱润滑性测定仪(BOCLE)法

采用球柱润滑性测定仪法,按照SH/T 0687—2000《航空涡轮燃料润滑性测定法(球柱润滑性测定仪法)》进行航空煤油润滑性试验。将添加二聚酸的航空煤油试样放入试验油池中,保持池内空气相对湿度为10%,将试验钢球固定在垂直安装的卡

盘中,使之正对一个轴向安装的钢环并加上负荷。试验柱体部分浸入油池并以固定速度旋转,在试验钢球上产生的磨痕直径就是试验润滑性的量度,在显微镜下测定其磨痕直径,用WSD表示,即椭圆长轴长度与短轴长度的平均值。

1.2.4.2 高频往复试验机(HFRR)法

采用高频往复试验机法,按照SH/T 0765—2005《柴油润滑性评定法(高频往复试验机法)》进行润滑性试验。将添加二聚酸的航空煤油试样放在一定温度下的油槽内,固定在垂直夹具中的试验钢球按照加载负荷对水平安装的试验钢片进行加载,试验钢球按照设定的频率和冲程作往复运动,钢球和钢片的接触界面完全浸在试样中,往复运动75 min后卸下试验钢球,在显微镜下测定试验钢球的磨痕直径。根据试验温度和试验湿度把钢球的磨痕直径校正到标准状况下的数值,试验样品的润滑性用校正后的磨痕直径(Ws1.4)表示,同时获得平均成膜率和平均摩擦系数指标。

2 结果与讨论

2.1 原料油脂脂肪酸组成

目前,二聚酸的合成机制尚未明确,一般认为是含双键的不饱和脂肪酸先共轭化,形成共轭双键,然后按Diels-Alder反应机制进行加成反应,其次为碳正离子机制,在双键处形成正离子,还可能涉及到氢转移加成反应^[12]。无论按照哪种反应机制进行,反应原料中都需要含有双键或者共轭双键。表2为原料油的脂肪酸组成及含量。

表2 桐油、棉籽油及妥尔油酸脂肪酸组成及含量 %

样品	桐油酸	油酸	亚油酸	棕榈酸	硬脂酸	其他
妥尔油酸	-	61.42	33.06	-	-	5.52
桐油	70.02	9.60	11.32	3.96	4.03	1.07
棉籽油	-	27.16	50.31	11.03	1.95	9.55

由表2可看出,妥尔油酸中油酸和亚油酸总含量达到94.48%,可以作为合成二聚酸的优质原料。棉籽油中油酸和亚油酸总含量为77.47%,并且亚油酸的含量接近油酸含量的2倍,有利于按照Diels-Alder反应机制进行加成反应。桐油中含有70.02%的桐油酸、9.60%的油酸和11.32%的亚油酸,反应过程中无须进行双键共轭化就可进行Diels-Alder加成反应。

2.2 二聚酸性质

图1为棉籽油基二聚酸的典型高效液相色谱图。

由图1可看出,二聚酸粗品中主要包括二聚酸、未反应的单酸及三聚酸,经二级分子蒸馏精制后得

到的产物二聚酸外观为淡黄色液体且纯度大幅提高,大于98%。图2、图3分别为棉籽油基二聚酸、桐油基二聚酸及妥尔油酸基二聚酸的红外光谱图和核磁共振碳谱图。

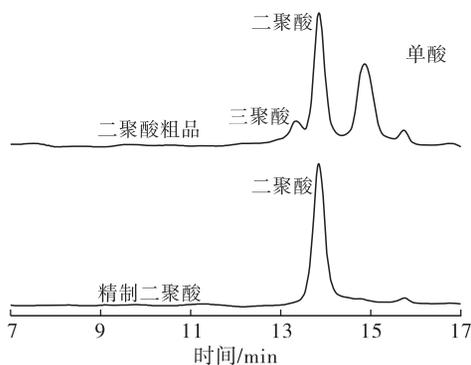


图1 棉籽油基二聚酸的高效液相色谱图

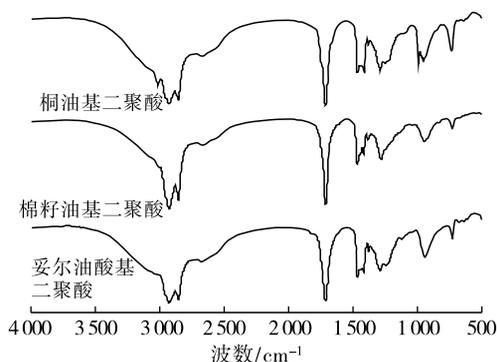


图2 3种二聚酸的红外光谱图

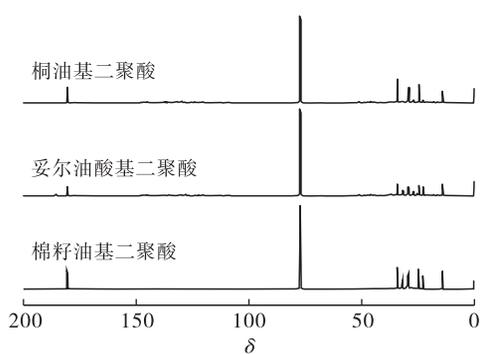


图3 3种二聚酸的核磁共振碳谱图

由图2可看出:3种二聚酸在 1705 cm^{-1} 处的特征吸收峰是羰基 $\text{C}=\text{O}$ 的伸缩振动吸收峰, 1282 cm^{-1} 处是羧基 $\text{C}-\text{O}$ 的伸缩振动吸收峰, 934 cm^{-1} 处是羧基上的 $-\text{OH}$ 的面外变形振动吸收峰,说明这3种二聚酸均含有羧酸; $725\sim 720\text{ cm}^{-1}$ 是 $-(\text{CH}_2)_n (n\geq 4)$ 的特征吸收峰,说明3种二聚酸均含有直链 $-(\text{CH}_2)_n (n\geq 4)$ 的结构单元^[13]。红外光谱图表明,这3种二聚酸均具有明显的羧酸结构且主要以链状为主。由图3可看出,3种二聚酸的 ^{13}C 核磁共振谱图中化学位移为181左右处均有1个

峰,表征的是一 COOH 结构,说明3种二聚酸抗磨剂中均存在羧酸结构,与红外表征结果相一致。

经测定,3种二聚酸的酸值(KOH)均大于 185 mg/g 。

综上,3种不同原料制备的二聚酸具备作为抗磨剂的分子结构。

2.3 二聚酸对航空煤油润滑性的影响

分别按照1.2.4.1 BOCLE法和1.2.4.2 HFRR法测定添加二聚酸的航空煤油的磨痕直径,考察3种二聚酸对航空煤油润滑性的改善作用,结果见图4。

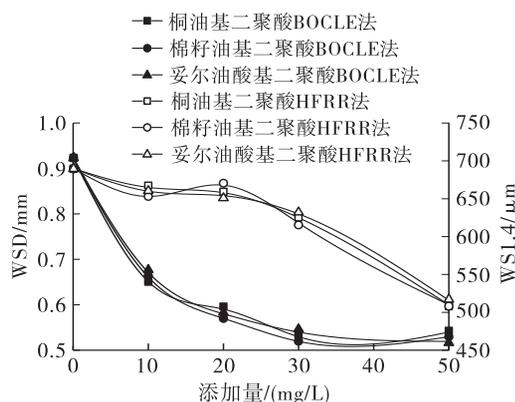


图4 二聚酸添加量对航空煤油 BOCLE法和 HFRR法润滑性的影响

由图4可看出,随着二聚酸添加量的增加,BOCLE法的磨痕直径不断减小,对航空煤油润滑性的改善作用逐渐增大,当添加量达到 20 mg/L 时,3种二聚酸均可使磨痕直径从 0.92 mm 降到 0.65 mm 以下,可满足GB 6537—2018《3号喷气燃料》中的军用要求(润滑性磨痕直径不大于 0.65 mm),当添加量达到 30 mg/L 以上,润滑性基本保持不变。由图4还可看出,随着3种二聚酸添加量的增加,HFRR法的磨痕直径总体上呈先缓慢下降后快速下降的趋势,当添加量达到 50 mg/L 时,校正后的磨痕直径从 $690\text{ }\mu\text{m}$ 降到 $550\text{ }\mu\text{m}$ 以下,说明增大二聚酸添加量可减小磨痕直径,提高航空煤油的润滑性。

两金属表面抗磨剂平均成膜率越低,摩擦系数越大,说明两摩擦副之间的微凸体可以明显接触,磨痕直径大,润滑作用差;两金属表面抗磨剂平均成膜率越高,摩擦系数越小,说明在两摩擦副之间形成了一层有效的抗磨性保护膜,可以有效分离两摩擦副之间的微凸体,起到降低摩擦和磨损的作用,磨痕直径就会越小^[14-15]。图5反映了在HFRR试验中二聚酸添加量对航空煤油平均成膜率和平均摩擦系数的影响。

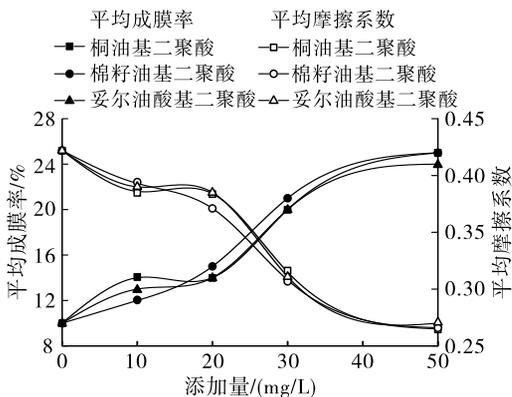


图 5 HFRR 法中二聚酸添加量对航空煤油平均成膜率和平均摩擦系数的影响

由图 5 可知,航空煤油的平均摩擦系数和平均成膜率分别是 0.412 和 10%。随着二聚酸添加量的增大,航空煤油的平均摩擦系数持续降低,平均成膜率逐渐增大,当添加量为 50 mg/L 时,添加 3 种二聚酸的航空煤油的平均摩擦系数均可降到 0.265 以下,平均成膜率均达到 24% 以上,平均摩擦系数和平均成膜率的变化规律与二聚酸对航空煤油润滑性的改善规律相一致。

二聚酸分子是由可产生缔合作用的非极性部分和能吸附在金属表面的极性部分组成,羧基等极性基团通过强吸附力吸附在金属表面,而烃基等非极性疏水端溶于油中,并通过范德华力缔合在一起,相邻的二聚酸羧基之间靠氢键作用进一步结合在一起,使二聚酸形成互相平行的分子簇,进而在金属表面形成润滑膜而起到有效的润滑作用,阻止两摩擦副之间发生直接接触与摩擦(抗磨机制见图 6)。不饱和官能团如酯基、羟基等越多,润滑膜越致密,抗磨效果越好。

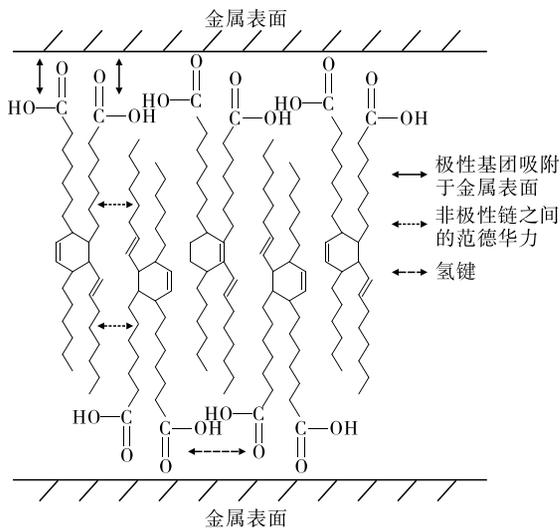


图 6 二聚酸分子抗磨机制示意图

2.4 磨损表面形貌分析

基于 3 种二聚酸的抗磨性相当,抗磨机制一致,

以棉籽油基二聚酸为例,对 BOCLE 法和 HFRR 法试验球进行了显微镜观测并分析其形貌。图 7 为不同棉籽油基二聚酸添加量下 BOCLE 法的试验球在显微镜下放大 100 倍的磨痕形貌,图 8 为试验球放大 500 倍的磨痕形貌。

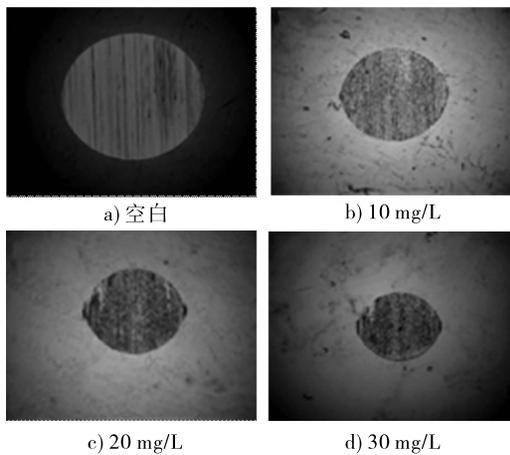


图 7 不同棉籽油基二聚酸添加量下 BOCLE 法试验球的磨痕形貌(100 ×)

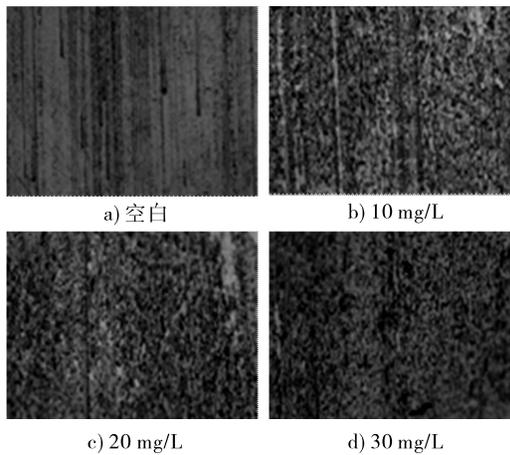


图 8 不同棉籽油基二聚酸添加量下 BOCLE 法试验球的磨痕形貌(500 ×)

由图 7 和图 8 可看出,航空煤油的润滑性磨痕为较大的椭圆形,具有很多犁沟较深的划痕,属于擦伤磨损。这主要是因为航空煤油基础油中的有效抗磨组分较少,无法在摩擦副之间形成润滑膜,导致严重的擦伤磨损。当二聚酸添加量为 10 mg/L 时,磨痕直径变小且出现多点腐蚀的迹象。二聚酸的羧基会吸附在摩擦副表面形成保护膜,同时磨痕表面还受到腐蚀作用,腐蚀块在摩擦作用下脱落形成腐蚀坑。当二聚酸添加量达到 20 mg/L 时,磨痕直径持续变小且腐蚀点变多变大。当二聚酸添加量增大到 30 mg/L 时,磨痕直径进一步减小。说明增加二聚酸的添加量可使摩擦副表面的吸附由物理吸附转变为化学吸附,形成有效的润滑膜,产生“腐蚀保护效应”,从而提升抗磨效果^[16-17]。

图9为不同棉籽油基二聚酸添加量下HFRR法的试验球在显微镜下放大100倍的磨痕形貌。由图9可看出,航空煤油的润滑性磨痕呈椭圆形,具有明显的边界,划痕较多且产生很多黑色氧化物质,属于擦伤磨损。随着二聚酸添加量的不断增大,摩擦表面黑色氧化物质减少。当二聚酸添加量达到50 mg/L时,摩擦表面无明显的黑色氧化物质,犁沟深的划痕进一步减少。

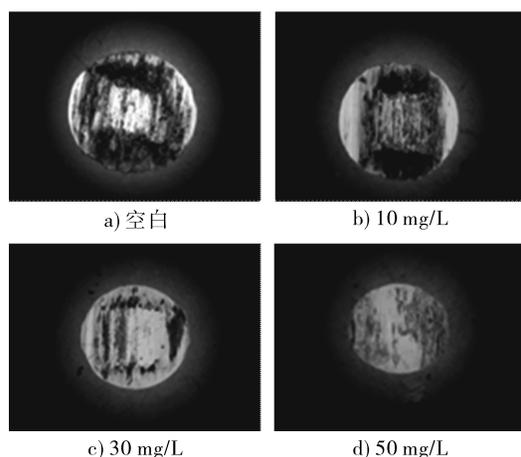


图9 不同棉籽油基二聚酸添加量下HFRR法试验球磨痕形貌(100×)

3 结论

(1) 桐油基、棉籽油基及妥尔油酸基二聚酸均具有长碳链和羧基官能团。羧基通过强电负性吸附在金属表面,羧基之间的氢键以及非极性端通过范德华力等使二聚酸分子形成平行分子簇,进而在金属表面形成有效润滑膜,阻止两摩擦副之间发生直接接触与摩擦,显示出良好的润滑性。

(2) 在BOCLE法中,随着二聚酸添加量的不断增大,润滑性磨痕直径、表面划痕及深度不断减小。当二聚酸添加量为20 mg/L时,3种二聚酸均可使航空煤油润滑性磨痕直径从0.92 mm降到0.65 mm以下,满足GB 6537—2018《3号喷气燃料》要求,且3种二聚酸的润滑能力相当。

(3) 在HFRR法中,随着二聚酸添加量的不断增大,润滑性磨痕直径、犁沟深的划痕进一步减少,并且摩擦表面无明显黑色氧化物。当二聚酸添加量为50 mg/L时,3种二聚酸均可使润滑性磨痕直径降到550 μm以下,平均摩擦系数均可降到0.265以下,平均成膜率均达到24%以上,且平均摩擦系数和平均成膜率的变化规律与二聚酸对航空煤油润滑性改善规律相一致。

参考文献:

- [1] LACEY P I. Wear with low-lubricity fuels; part I development of a wear mapping technique[J]. *Wear*, 1993, 160:333 - 343.
- [2] LIU S W, ZHOU H X, YU S T, et al. Dimerization of fatty acid methyl ester using Bronsted-Lewis acidic ionic liquid as catalyst[J]. *Chem Eng J*, 2011, 174(1):396 - 399.
- [3] 韩松霖,刘多强. 简述喷气燃料添加剂的发展[J]. *石油化工应用*, 2008, 27(4):5 - 8.
- [4] 苗勇,纪琳. 原油脱酸方法研究进展[J]. *石油与天然气化工*, 2006, 35(4):292 - 294.
- [5] 冯光柱,付黎敏,崔英德,等. 二聚脂肪酸应用研究进展[J]. *中国油脂*, 2006, 31(9):37 - 41.
- [6] 温诗铸. 摩擦学原理[M]. 北京:清华大学出版社, 1991: 459 - 460.
- [7] GOODRUM J W, GELLER D P. Influence of fatty acid methyl ester from hydroxylated vegetable oils on diesel fuel lubricity[J]. *Bioresour Technol*, 2005, 96(7):851 - 855.
- [8] ANASTOPOULOS G, KALLIGEROS S, SCHINAS P, et al. Effect of dicarboxylic acid esters on the lubricity of aviation kerosene for use in CI engines [J]. *Friction*, 2013, 1(3):271 - 278.
- [9] 李进,张世堂,胡泽祥. 国内外喷气燃料润滑改进剂综述[J]. *合成润滑材料*, 2020, 47(2):26 - 30.
- [10] 胡泽祥,丁德盘,梁立波,等. 环烷酸在超低硫喷气燃料中的摩擦学性能[J]. *润滑与密封*, 2017, 42(12):115 - 120.
- [11] 李妮,杨晶,麻文杰,等. 均相反应制备桐油酸工艺的研究[J]. *中南林业科技大学学报(自然科学版)*, 2014, 34(4):114 - 117.
- [12] TOLVANEN P, MÄKI-ARVEA P, KUMAR N, et al. Thermal and catalytic oligomerisation of fatty acids[J]. *Appl Catal A - Gen*, 2007, 330:1 - 11.
- [13] 张华,彭勤纪,李亚明,等. 现代有机波谱分析[M]. 北京:化学工业出版社, 2005:251 - 262.
- [14] 张雁玲,凌凤香,雒亚东,等. 甲酯型生物柴油对超低硫柴油润滑性能的影响[J]. *中国油脂*, 2019, 44(9):71 - 80.
- [15] 李进,陈国需,胡泽祥,等. 二聚酸的合成及其对喷气燃料润滑性的影响[J]. *石油学报:石油加工*, 2016, 32(2):375 - 381.
- [16] 陈国需,李进,胡泽祥,等. 环烷酸的结构分析及对燃料润滑性的影响[J]. *石油学报:石油加工*, 2016, 32(2):326 - 333.
- [17] 李进,陈国需,胡泽祥,等. 蓖麻油用作喷气燃料润滑剂的润滑性及润滑机制[J]. *润滑与密封*, 2015, 40(8):17 - 21.