

两种抗水解剂作用于 TMPTO 的效果分析

田莹, 吕涯*

(华东理工大学石油加工研究所, 上海 200237)

摘要:三羟甲基丙烷油酸酯(TMPTO)具有黏度指数高、环境友好等特点,但酯类基础油极易水解。为了改善基础油的水解,选取2种抗水解剂 *N,N'*-二异丙基碳化二亚胺(DIC)以及2-甲基-2-噁唑啉分别加入到TMPTO中,通过ASTM D261-09进行实验,考察其对TMPTO水解的抑制作用。结果表明,随着2种抗水解剂质量分数的增加,抑制TMPTO水解的作用也越强。DIC和2-甲基-2-噁唑啉的最适宜质量分数分别为0.5%和0.8%,其中DIC的抗水解效能更高。加入抗水解剂不会对极压抗磨性和抗腐蚀性产生影响。

关键词:碳化二亚胺;噁唑啉;水解;三羟甲基丙烷油酸酯;环境

中图分类号:TE6

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2020)04-0173-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2020.04.037

Analysis on effect of two anti-hydrolysis agents on TMPTO

TIAN Ying, LV Ya*

(Petroleum Processing Research Institute, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: Trimethylolpropane oleate (TMPTO) has been widely used as a petroleum product with a more than 90% of biodegradation rate, high viscosity index and environmental friendliness. However, ester-series base oils are more susceptible to be hydrolysis in humid environment, resulting in oil loss or even machine failure. In order to improve this shortage, two representative anti-hydrolysis agents including *N,N'*-diisopropyl carbodiimide (DIC) and 2-methyl-2-oxazoline are selected and respectively added into TMPTO. ASTM D2619-09 (2014) "Hydraulic Fluid Hydrolysis Stability Test Method (Beverage Bottle Method)" is carried out to investigate their inhibition of TMPTO hydrolysis by each anti-hydrolysis agent alone at different contents. The hydrolytic stability of TMPTO is found to increase with the increasing dosage of anti-hydrolysis agent. The optimum dosages of DIC and 2-methyl-2-oxazoline are 0.5% and 0.8%, respectively. Between them, DIC has higher hydrolysis resistance. In addition, it is also verified that the addition of anti-hydrolysis agent will not affect TMPTO's extreme pressure abrasion resistance and corrosion resistance.

Key words: carbodiimide; oxazoline; hydrolysis; trimethylolpropane oleate; environment

随着现代化工业的快速发展以及对环境保护的重视程度日益增加,作为合成润滑剂的酯类基础油,除了具有良好的黏温特性、氧化安定性等特性,还具有独特的可生物降解性,因而受到了越来越多的关注。TMPTO具有高达90%以上的生物降解率、润滑性和抗燃性好、黏度指数高等特点^[1-3],广泛地应用于调配环境友好型液压油、水上游艇发动机油以及作为一种油性剂在各类金属加工液中使用。但由于TMPTO分子结构中酯基官能团的固有特性^[4],导致其具备一定的吸水性。相比于矿物油而言,酯类基础油在潮湿的环境中更易发生水解,产生一定量的羧酸和醇,羧酸又进一步促进水解,并且会腐蚀装

置,从而造成油品的损失甚至危害机械设备。

为了改善这种现象,大量的研究发现,分子中某些特定官能团的化合物加入酯类油中能够起到一定的抑制水解的作用,如含有—N=C=N—官能团的碳二亚胺及带有双键的含氮杂环等^[5-17]。基于此,笔者选取2种有代表性的抗水解剂 *N,N'*-二异丙基碳化二亚胺(DIC)以及2-甲基-2-噁唑啉,分别将其加入到TMPTO中,通过ASTM D2619-09(2014)《液压液水解安定性测试法(饮料瓶法)》进行实验,考察在加入不同质量分数、不同时间的情况下,2种抗水解剂对TMPTO的水解过程的抑制作用,并分析添加剂对其极压抗磨性和抗腐蚀性能的影响。

收稿日期:2019-06-22;修回日期:2020-02-06

作者简介:田莹(1995-),女,硕士研究生,研究方向为润滑油及其添加剂,actaya@foxmail.com;吕涯(1968-),女,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为石油产品品质优化,通讯联系人,ylv@ecust.edu.cn。

1 实验材料和方法

1.1 仪器及试剂

仪器: DHG-9023A 烘箱, 上海实研电炉有限公司生产; Nicoet 6700 红外光谱仪, 美国 Nicoet 公司生产; PHS-3C 台式 pH 分析仪, 上海火飞实业有限公司生产; MS-800 四球式摩擦试验机, 厦门试验机厂生产, 试验机主轴转速为 $(1\ 200 \pm 50)$ r/min, 试件所用钢球为上海钢球厂生产, 材质 GCR15, 精度等级为 2 级, 直径为 12.7 mm, 硬度为 HRC59-61。

试剂: *N,N'*-二异丙基碳化二亚胺 (DIC), 分析纯, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司生产; 2-甲基-2-咪唑啉, 分析纯, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司生产; 异丙醇, 分析纯, 上海泰坦科技股份有限公司生产; 甲苯, 分析纯, 上海凌峰化学试剂有限公司生产; 氢氧化钾, 分析纯, 上海凌峰化学试剂有限公司生产; 石油醚, 分析纯, 上海泰坦科技股份有限公司生产; 三羟甲基丙烷油酸酯 (TMPTO), 工业级, 安庆市中创生物工程有限公司生产, 主要理化结构如表 1 所示。

表 1 TMPTO 的主要理化性质

项目	指标
外观	淡黄色透明液体
黏度(40℃)/(mm ² ·s ⁻¹)	46
酸值/[mg(KOH)·g ⁻¹]	0.7433
闪点(开口)/℃	300
倾点/℃	-27
皂化值/[mg(KOH)·g ⁻¹]	185

1.2 实验方法

1.2.1 水解安定性实验方法

室温下称量不同质量的 DIC 和 2-甲基-2-咪唑啉, 并将其分别加入到 TMPTO 中调配成不同质量分数的油样, 静置 1 d 后观察到无浑浊沉淀现象。再称取 75 g 混合油样, 与 25 g 蒸馏水混合放入干燥的带有惰性密封的玻璃瓶中, 加入已称重并打磨光滑无斑痕的铜片, 将瓶盖密封, 放置于恒温箱里, 将温度设定在 93℃, 保持转速 5 r/min 使玻璃瓶头尾颠倒旋转受热^[18]。分别在水解反应 48、96、144、192 h 后取出玻璃瓶, 将样品倒入分液漏斗进行分液, 用蒸馏水对油相以及铜片反复冲洗, 冲洗液倒入

水相, 上层油样经脱水后采用 GB/T 7304 测定酸值; 铜片冲洗干燥后测量质量, 并将所有冲洗液收集置于水相, 同时测定水相酸度。分析比较水解前后铜片的失重、水相油相酸值变化来考察 2 种抗水解剂作用的规律。

1.2.2 抗摩擦性能验证方法^[19]

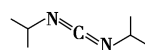
分别取 10 g 纯 TMPYO 以及上述配制好的混合油样, 将其倒入已放置 3 个钢球的油杯中, 旋转夹紧, 保证油品没过钢球顶部。同时安装好上球卡具, 将油杯放置在杯座上, 缓慢施加 294 N 的试验压力, 使油杯与上部钢球接触。开动装置, 保证转速在 1 200 r/min 下试验 30 min, 完成后取下油杯, 放在光学显微镜下观察钢球上的磨斑直径。通过磨斑直径的大小及钢球表面摩擦情况分析加入抗水解剂后的 TMPTO 抗摩擦性能是否发生改变。

每次抗磨实验结束后, 调整钢球位置, 将油杯装回杯座, 施加不同负荷, 开动装置运行 10 s, 观察磨斑直径并与文献值做对比, 考察其最大无卡咬负荷 (P_B 值)。考察加入添加剂对 TMPTO 是否产生极压性能以及产生何种影响。

2 实验结果与讨论

2.1 DIC 与 2-甲基-2-咪唑啉结构特征

DIC 分子式为 $C_7H_{14}N_2$, 为单碳化二亚胺, 分子中只含有一个 $-N=C=N-$ 官能团, 外观为无色透明液体, 有强烈的刺激性气味。2-甲基-2-咪唑啉分子式为 C_4H_7NO , 是一种带有双键的五元含氮杂环化合物, 化学性质活泼, 可以与多种物质发生开环反应。DIC 和 2-甲基-2-咪唑啉的分子结构式如图 1 所示。DIC 和 2-甲基-2-咪唑啉的红外光谱图如图 2 所示。从图 2(a) 中可以看出, 波数 $2\ 150\ cm^{-1}$ 处的强吸收峰为 DIC 中官能团 $-N=C=N-$ 的特征峰; $2\ 962\ cm^{-1}$ 处的吸收峰为甲基的 C—H 的伸缩振动峰。从图 2(b) 中可以看出, $1\ 060\ cm^{-1}$ 处的强吸收峰为 2-甲基-2-咪唑啉中 C—O 键的振动峰; $1\ 200\ cm^{-1}$ 处的强吸收峰为环状结构中 $-C-C-$ 的振动峰; $1\ 450\ cm^{-1}$ 处为甲基的 C—H 伸缩振动峰; $1\ 675\ cm^{-1}$ 处为 C=N 键的伸缩振动峰。



(a) DIC



(b) 2-甲基-2-咪唑啉

图 1 DIC 和 2-甲基-2-咪唑啉结构式

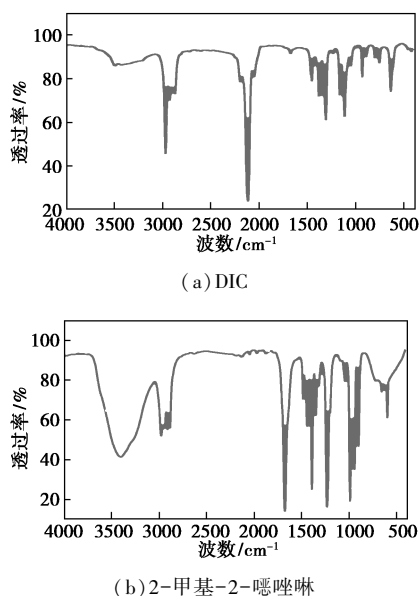


图2 DIC与2-甲基-2-咪唑啉红外光谱图

2.2 抗水解剂质量分数对水解过程的影响

2.2.1 DIC对TMPTO水解过程的抑制作用

将质量分数分别为0.1%、0.3%、0.5%、0.8%、1.0%的DIC加入到纯TMPTO中,分别配制成100g的混合油样。经过48h的水解性能测试实验后取出,测定各个混合油样的油层酸值、水层酸值和铜片失重及腐蚀情况。考察DIC添加到TMPTO中最适宜的质量分数。添加不同质量分数的DIC在TMPTO中水解48h后的油层酸值和水层酸值如图3所示。从图3可以看出,添加了DIC的混合油样油层酸值和水层酸值均明显小于未添加的TMPTO,并且随着DIC质量分数的增加,样品的油层酸值和水层酸值都随之降低。说明DIC在TMPTO中有明显的抑制水解的作用。油层酸值和水层酸值有着相同的变化趋势。在DIC质量分数为0~0.5%区间范围内时,油层酸值和水层酸值下降幅度十分明显,油层酸值从 $0.926 \text{ mg}(\text{KOH})/\text{g}$

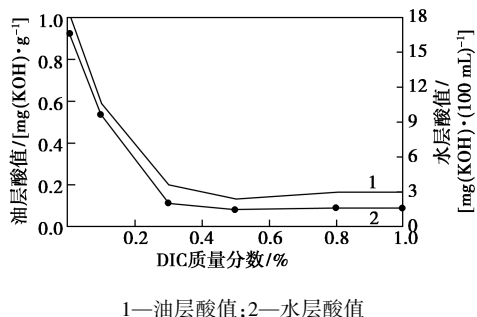


图3 水解48h后不同DIC质量分数样品的油层酸值和水层酸值

下降到了 $0.081 \text{ mg}(\text{KOH})/\text{g}$,水层酸值则从 $18.70 \text{ mg}(\text{KOH})/(100 \text{ mL})$ 降低到 $2.38 \text{ mg}(\text{KOH})/(100 \text{ mL})$ 。当DIC质量分数继续增大时,油层酸值和水层酸值下降趋势波动减缓,并随着添加剂质量分数的增多酸值略微升高。在质量分数从0.5%升高到1.0%的过程中,油层酸值仅从 $0.081 \text{ mg}(\text{KOH})/\text{g}$ 缓慢波动到 $0.091 \text{ mg}(\text{KOH})/\text{g}$,水层酸值变化到 $2.93 \text{ mg}(\text{KOH})/(100 \text{ mL})$ 。

将浸泡在混合样品中的铜片取出,清洗烘干并称量质量,与水解前质量进行对比。并将实验后的铜片与腐蚀标准色板比色,判断其腐蚀程度,结果如图4和表2所示。从图4和表2中可以看出,未加入添加剂的样品中铜片比其他加入添加剂的样品中铜片失重更明显。加入DIC后,铜片失重由 $0.629 \text{ mg}/\text{cm}^2$ 降低至 $0.360 \text{ mg}/\text{cm}^2$ 。当质量分数在0.5%以上时,铜片失重的变化幅度渐趋平稳,质量变化很小。通过比较法观察判定铜片的腐蚀程度发现,当DIC质量分数在0.3%及以上时,铜片的腐蚀程度由1b变成了1a,铜片的失重和腐蚀程度具有一定的协同效果。综合以上分析可得,当DIC的质量分数为0.5%时,既可以明显抑制TMPTO的水解过程,也能够对铜片起到一定的防腐蚀作用。

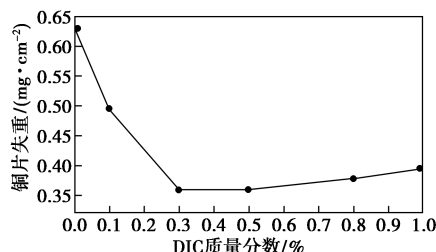


图4 水解48h后不同DIC质量分数对铜片质量的影响

表2 48h水解后不同DIC质量分数样品中铜片腐蚀程度

混合样品	铜片腐蚀程度	混合样品	铜片腐蚀程度
TMPTO	1b	TMPTO+0.5% DIC	1a
TMPTO+0.1% DIC	1b	TMPTO+0.8% DIC	1a
TMPTO+0.3% DIC	1a	TMPTO+1.0% DIC	1b

DIC分子具有极性,易吸附在金属表面,从而加深铜片的腐蚀速率。但由于DIC分子结构中存在2个有较大位阻的异丙基,对DIC在铜片上的吸附产生一定的阻滞作用,而且由于DIC对油品的抗水解作用,不但不会加快铜片的腐蚀,还会适当地延缓铜

片的腐蚀速率。

2.2.2 2-甲基-2-噁唑啉对 TMPTO 水解过程的抑制作用

将质量分数分别为 0.1%、0.3%、0.5%、0.8%、1.0% 的 2-甲基-2-噁唑啉加入到纯 TMPTO 中,分别配制成 100 g 的混合油样。经过 48 h 的水解性能测试实验后取出,测定各个混合油样的油层酸值、水层酸值和铜片失重及腐蚀情况,考察其添加到 TMPTO 中最适宜的质量分数。添加不同质量分数的 2-甲基-2-噁唑啉在 TMPTO 中水解 48 h 后的油层酸值和水层酸值如图 5 所示。从图 5 中可以看出,添加了 2-甲基-2-噁唑啉的混合油样的油层酸值和水层酸值均明显小于未添加的 TMPTO,并且随着质量分数的增加,样品的油层酸值和水层酸值都随之降低。说明 2-甲基-2-噁唑啉在 TMPTO 中有明显的抑制水解的作用。能够清楚地观察到油层酸值和水层酸值有着相同的变化趋势。在质量分数为 0~0.8% 区间范围内时,油层酸值和水层酸值下降幅度十分明显,油层酸值从 0.926 mg(KOH)/g 下降到了 0.087 mg(KOH)/g,水层酸值则从 18.70 mg(KOH)/(100 mL) 降低到 2.74 mg(KOH)/(100 mL)。当质量分数继续增大时,油层酸值和水层酸值下降趋势波动减缓,并随着质量分数的增多酸值略微升高。在质量分数从 0.8% 升高到 1.0% 的过程中,油层酸值从 0.087 mg(KOH)/g 缓慢升高到 0.092 mg(KOH)/g,水层酸值变化到 2.96 mg(KOH)/(100 mL)。

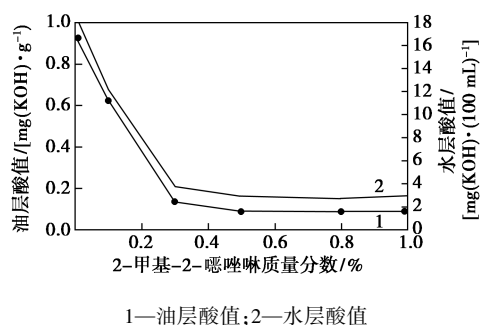


图 5 不同 2-甲基-2-噁唑啉质量分数样品的油层和水层酸值变化趋势

将浸泡在混合样品中的铜片取出,清洗烘干并称重质量,与水解前质量进行对比。并将实验后的铜片与腐蚀标准色板比色,判断其腐蚀程度。结果如图 6 和表 3 所示。从图 6 和表 3 中可以看出,未加入添加剂的样品中铜片比其他加入添加剂的样品中铜片失重更明显。加入 2-甲基-2-噁唑啉后,铜

片失重由 0.629 mg/cm² 降低至 0.045 mg/cm²。当质量分数为 0.8% 以上时,铜片失重的变化幅度渐趋平稳,质量变化很小。通过比较法观察判定铜片的腐蚀程度发现,当质量分数在 0.5% 及以上时,铜片的腐蚀程度由 1b 变成了 1a,铜片的失重和腐蚀程度具有一定的协同效果。综合以上分析可得,当 2-甲基-2-噁唑啉的质量分数为 0.8% 时,既可明显抑制 TMPTO 的水解过程,也能够对铜片起到一定的防腐蚀作用。

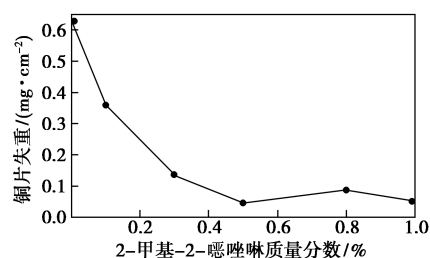


图 6 不同 2-甲基-2-噁唑啉质量分数对铜片质量的影响

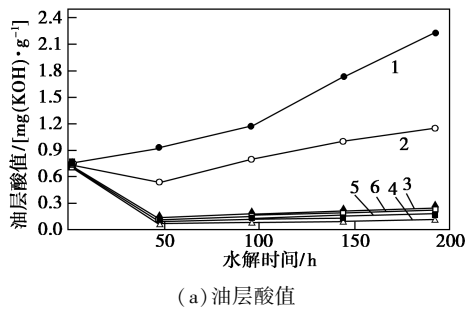
表 3 48 h 水解后 2-甲基-2-噁唑啉质量分数对铜片腐蚀程度

混合样品	铜片腐蚀程度
TMPTO	1b
TMPTO+0.1% 2-甲基-2-噁唑啉	1b
TMPTO+0.3% 2-甲基-2-噁唑啉	1b
TMPTO+0.5% 2-甲基-2-噁唑啉	1a
TMPTO+0.8% 2-甲基-2-噁唑啉	1a
TMPTO+1.0% 2-甲基-2-噁唑啉	1a

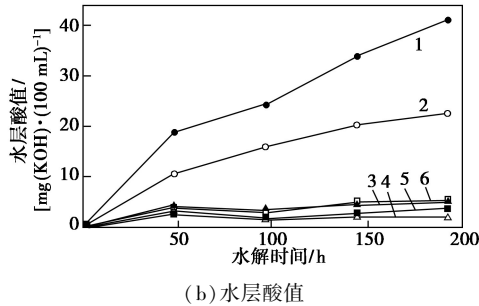
2.3 水解时间对水解过程的影响规律

为了探究 DIC 和 2-甲基-2-噁唑啉抑制水解作用效果随时间的变化情况,将混合油样分别水解 48、96、144、192 h 后取出进行酸值测定,测定结果如图 7 和图 8 所示。

从图 8 中可以看出,在不添加任何添加剂的情况下,TMPTO 的油层酸值在 192 h 内由刚开始的 0.743 mg(KOH)/g 上升到 2.230 mg(KOH)/g。酸值扩大约为原来的 3 倍。水层酸值也由一开始的 18.70 mg(KOH)/(100 mL) 增大为 41.00 mg(KOH)/(100 mL)。说明 TMPTO 随着时间的推移,水解程度不断加深。而加入了 DIC 和 2-甲基-2-噁唑啉的样品油层和水层酸值大幅度降低,并且随着时间的推移,酸值仅仅是略微上升,相比于未加添加剂的 TMPTO,水解作用得到明显抑制。通过对比发现,



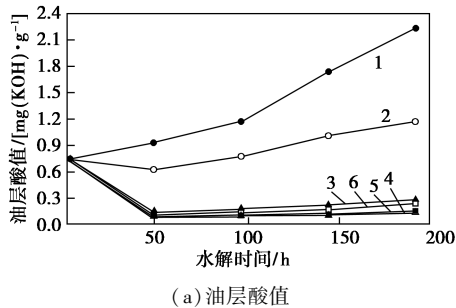
(a) 油层酸值



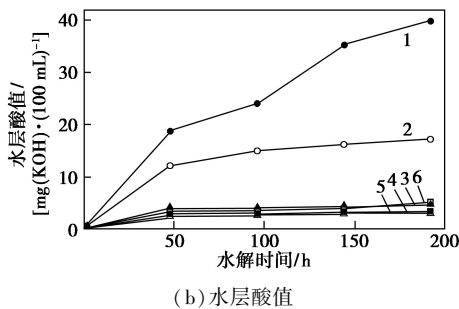
(b) 水层酸值

1—无添加剂;2—0.1%;3—0.3%;4—0.5%;5—0.8%;6—1.0%

图7 加入不同质量分数 DIC 后油层和水层酸值随水解时间的变化趋势



(a) 油层酸值



(b) 水层酸值

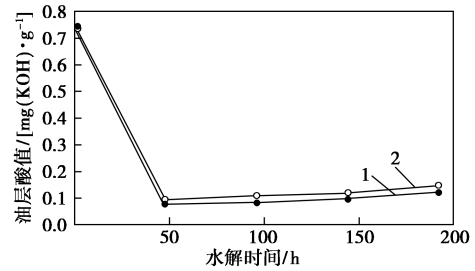
1—无添加剂;2—0.1%;3—0.3%;4—0.5%;5—0.8%;6—1.0%

图8 加入不同质量分数 2-甲基-2-咪唑啉后油层和水层酸值随水解时间的变化趋势

同样是油层酸值, DIC 和 2-甲基-2-咪唑啉对 TMPTO 水解的抑制作用效果相似,只是 DIC 的最佳作用效果的质量分数为 0.5%,而 2-甲基-2-咪唑啉的最佳作用效果的质量分数为 0.8%。说明 DIC 在两者之中具有更高效的水解抑制作用。

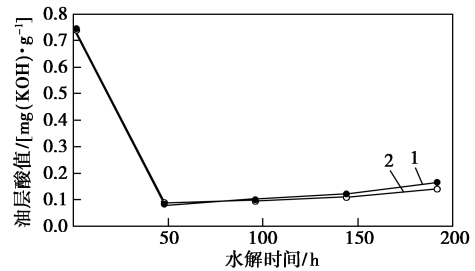
2 种抗水解剂的最佳作用质量分数下混合油样

酸值随水解时间的变化情况如图 9 所示。



1—0.5% DIC;2—0.5% 2-甲基-2-咪唑啉

(a) DIC 最佳作用质量分数



1—0.8% DIC;2—0.8% 2-甲基-2-咪唑啉

(b) 2-甲基-2-咪唑啉最佳作用质量分数

图9 各自最佳作用质量分数下的 2 种抗水解剂油层酸值随水解时间的变化

由图 9 中可以看出,最佳质量分数下 2 种抗水解剂的抗水解能力相近,相比而言由于 DIC 的最佳质量分数较低,因此 DIC 的作用效率更高。

DIC 分子中含有 1 个 —N=C=N— 官能团,反应活性很强,可以与 TMPTO 中的羧基离子耦合,经过一系列反应最后得到一种稳定的脲基结构(如图 10 所示),因此对 TMPTO 的水解过程起到一定的抑制作用。2-甲基-2-咪唑啉结构中有一个不稳定的环状结构(如图 11 所示),极易与羧基团发生开环反应,在 C—O 键处断裂,进行开环加成,从而减少反应体系中的游离羧基,使水解反应逆向进行^[20-21]。

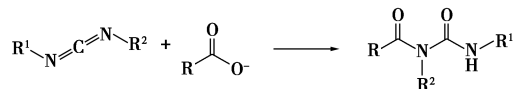


图 10 DIC 与酯基反应过程

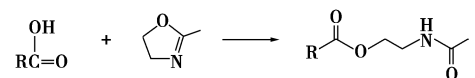


图 11 2-甲基-2-咪唑啉和羧基反应过程

2.4 混合油样的极压抗磨和抗腐蚀性能研究

利用立式四球式摩擦实验机考察加入水解稳定剂 DIC 和 2-甲基-2-咪唑啉的 TMPTO 的极压抗磨

性能是否发生改变以及改变的趋势。

选取抗水解性最为突出的质量分数作为实验质量分数,配制 20 g 含有 0.5% DIC 与 0.8% 2-甲基-2-噁唑啉的混合油样,常温搅拌 2 h,待添加剂完全溶解后按照上述步骤进行 3 次抗磨试验,取 3 次实验平均值,实验结果如表 4 所示。

表 4 加入不同添加剂后的 TMPTO 的磨斑直径

序号	添加剂	质量分数/ %	磨斑直径 WSD/mm	最大无卡咬 负荷 P_B /N
1	—	—	0.558	588
2	DIC	0.5	0.506	755
3	2-甲基-2-噁唑啉	0.8	0.487	726

从表 4 中可以看出,不添加抗水解剂时小钢球的磨斑直径为 0.558 mm,而添加了 DIC 和 2-甲基-2-噁唑啉后小钢球的磨斑直径降低为 0.506 mm 和 0.487 mm,磨斑直径变小,说明 2 种添加剂不仅没有恶化 TMPTO 的抗摩擦性能,还提升了其抗磨性能。比较最大无卡咬负荷值,加入了添加剂后的最大无卡咬负荷从原本的 588 N 上升到 700 N 以上,说明加入抗水解剂后也提升了 TMPTO 的极压性能。

3 结论

(1) 与无添加剂情况相比, DIC 与 2-甲基-2-噁唑啉都对 TMPTO 的水解过程有抑制作用。并且随着这两者的质量分数的增加,抗水解性能越来越好。

(2) 2 种抗水解剂都能在较长的时间范围内起到稳定水解的作用。在 TMPTO 中能够同时达到最好水解效果和对铜片防腐效果的 DIC 的质量分数为 0.5%, 而 2-甲基-2-噁唑啉的质量分数为 0.8%, 说明同样情况下, DIC 对 TMPTO 的抗水解效果更好。

(3) DIC 和 2-甲基-2-噁唑啉的加入在一定程度上还会适当提高其极压抗磨性。说明将这 2 类抗水解剂应用于酯类基础油中是可行的。

参考文献

[1] 杨奇,张维农,高新蕾.三羟甲基丙烷油酸酯类润滑油的抗磨损性能研究[J].华中师范大学学报(自然科学版),2017,51(4):470-478.

[2] 吕涯.石油产品添加剂[M].上海:华东理工大学出版社,2012.

[3] Roy M Mortier, Malcolm F Fox, Stefan T Orszulik. Chemistry and technology of lubricants[M]. Berlin: Springer, 2010.

[4] William H Brown, Brent L Iverson, Eric Anslyn, et al. Foote. Organic chemistry[M]. Seventh Edition, U.S.: Cengage Learning, 2013.

[5] 徐海涛,杨勇,李序霞,等.碳化二亚胺的制备及其水解稳定作用[J].弹性体,2003,13(6):71-73.

[6] Brown Ward Thomas, Day James Clarence English Vil. A crosslinker and a method of crosslinking a coating binder polymer: US, C08G18/76[P]. 1994-12-14.

[7] Elmer Otto C. Method for making urethane-terminated polycarbodiimides and products thereof: US, C08G18/00[P]. 1978-02-28.

[8] 谢飞,刘宗惠,魏德卿.聚碳化二亚胺研究进展[J].高分子材料科学与工程,2001,17(2):5-9.

[9] 姚建文,陈静,殷延开.碳化二亚胺抗水解剂的研究进展[J].精细与专用化学品,2011,19(1):8-11.

[10] Inata H, Matsumura S. Chain extenders for polyesters. I. Addition-type chain extenders reactive with carboxyl end groups of polyesters[J]. Applied Polymer Science, 1985, 30: 3325-3337.

[11] 陈玉君,杨始堃,游飞越,等.双噁唑啉化合物偶联聚酯的研究(I)双噁唑啉化合物的合成及其性能[J].聚酯工业,1996,31:16-20.

[12] 杨始堃,陈玉君,游飞越,等.PBT/PET 固态缩聚产物热行为[J].合成技术及应用,1997,3:6-9.

[13] 杨始堃,游飞越,陈玉君.聚对苯二甲酸丁二酯结构与性能研究进展[J].聚酯工业,1995,1:1-16.

[14] 唐峰,蔡长庚,贾德民.噁唑啉类化合物在聚合物改性中的应用[J].化工新型材料,2004,32(7):43-45.

[15] De La Rosa V R, Bauwens E, Monnery B D, et al. Fast and accurate partial hydrolysis of poly(2-ethyl-2-oxazoline) into tailored linear polyethylenimine copolymers[J]. Polymer Chemistry, 2014, 5(17): 4957-4964.

[16] Pavlina Holcapkova, Petr Stloukal, Pavel Kucharczyk, et al. Anti-hydrolysis effect of aromatic carbodiimide in poly(lactic acid)/wood flour composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017, 103: 283-291.

[17] 郑哲,王建华,江泽琦,等.碳化二亚胺用作酯类液压油抗水解添加剂性能的研究[J].石油炼制与化工,2016,47(6):90-93.

[18] Standard test method for hydrolytic stability of hydraulic fluids (beverage bottle method): ASTM D2619-09(2014) [S]. U. K.: ASTM Int'l, 2014-01-10.

[19] 中国石油化工集团.润滑油抗磨损性能的测定 四球法:NB/SH/T 0189—2017[S].国家能源局,2018-06-01.

[20] 谭卓华.塑料水解稳定剂的研究进展[J].塑料助剂,2011,(3):12-16.

[21] 张杰.莱茵化学抗水解剂在塑料加工中的应用[J].塑料工业,2006,34:274-276. ■