

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2020.05.006

秦皇岛 32-6 环烷基原油生产冷冻机油研究

乔 琦, 刘 燕

(中海油气(泰州)石化有限公司, 江苏 泰州 225300)

摘要:以秦皇岛 32-6 减二馏分油为原料,考察(加氢)操作工艺对目标基础油倾点的影响,确定最佳的操作工艺条件,并以加氢侧线油为原料,经过添加剂配方的评选,对其氧化安定性、润滑性、泡沫稳定性进行了考察,最终确定 L-DRG10 添加 0.6% 抗氧化剂 B, 2.6% 抗磨剂 C, 0.001 5% 抗泡剂 G; L-DRA46 添加 0.3% 抗氧化剂 B, 0.8% 抗磨剂 C, 0.001 5% 抗泡剂 G。研制出符合 GB/T 16630—2012 质量标准的 L-DRG10 和 L-DRA46 冷冻机油。

关键词:冷冻机油;加氢基础油;添加剂

中图分类号:TP 39

文献标志码:A

文章编号:2095-0411(2020)05-0043-07

Study on Production of Series Refrigerator Oil by Qinhuangdao 32-6 Naphthenic Crude Oil

QIAO Qi, LIU Yan

(CNOOC Oil & Gas (Taizhou) Petrochemical Co., Ltd., Taizhou 225300, China)

Abstract: The influence of operation process (hydrogenation) on the pour point of target base oil was investigated with Qinhuangdao 32-6 distillate as raw material. The optimum operating conditions were determined. The key properties of oxidation resistance, antiwear and foaming properties were investigated through the selection of additives with the distillate oil as base oil, final solution, 0.6% antioxidant B, 2.6% antiwear C, 0.001 5% antifoam G were added to L-DRG10, 0.3% antioxidant B, 0.8% antiwear C, 0.001 5% antifoam G were added to L-DRA46. L-DRG10 and L-DRA46 refrigerating oil with GB/T 16630—2012 quality standard were developed.

Key words: refrigerator oil; hydrotreating base oil; additive

冷冻机油是对制冷压缩机运转部件进行润滑和密封的专用油,是制冷系统中决定和影响制冷装置功能和效果的至关重要的组成部分。随着冰箱、冷柜、空调、大型冷库等制冷设备发展日趋完善,并向着

收稿日期:2020-03-06。

作者简介:乔琦(1986—),女,江苏泰州人,硕士,工程师。E-mail:qiaoqi3@cnooc.com.cn

引用本文:乔琦,刘燕. 秦皇岛 32-6 环烷基原油生产冷冻机油研究[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2020, 32(5): 43-49.

节能化、小型化、轻量化和高效化发展。这些变化进一步促进了冷冻机油的研究与发展,同时对冷冻机油的性能和品质提出了更高要求。高品质的冷冻机油需要具备以下特征:①与制冷剂共存时优良的化学安定性和相容性;②优良的低温流动性、润滑性、抗泡性;③基础油易于生产,原料来源稳定^[1-2]。

环烷基原油其润滑油馏分的化学组成以环烷烃、芳香烃为主,直链石蜡烃少,凝点较低^[3],在制冷系统低温部位,能防止油与冷冻剂混合物沉淀表面絮状蜡而阻塞系统,是生产冷冻机油的优质原料,在目前冷冻机油生产中仍然占有举足轻重的位置^[4]。

1 装置简介

1.1 环烷基润滑油加氢工艺流程

中海油气(泰州)石化有限公司(以下简称“泰州石化”)拥有 20 万 t/a 环烷基润滑油高压加氢装置^[5],以秦皇岛 32-6 减二线馏分油为原料,采用三段高压加氢组合工艺,流程简图如图 1 所示,生产出的环烷基润滑油基础油具有低倾点、高密度、氧化安定性好等特点,用于生产满足 GB/T 16630—2012 质量要求的 L-DRG10 和 L-DRA46 冷冻机油。

1.2 原料性质

秦皇岛 32-6 原油是中国渤海湾中部海域所产原油,该原油 20 ℃密度为 949.9 kg/m³,凝固点 4 ℃,硫含量为 0.22%,氮含量为 3 396 mg/kg,酸值高达2.91 mg/g,50 ℃运动黏度为 364.8 mm²/s,残炭、灰分均稍高,金属含量中镍、钒含量分别为 14.1 mg/kg 和 0.56 mg/kg,特性因数为 11.70,该原油按特性因数分类属低硫重质环烷基-中间基原油,性质见表 1^[6]。

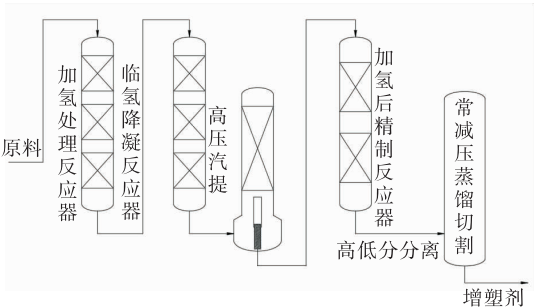


图 1 环烷基润滑油加氢工艺流程简图

Fig.1 Diagram of hydrogenation process of naphthenic base lubricating oil

表 1 秦皇岛 32-6 原油性质分析

Table 1 Property analysis of Qinhuangdao 32-6 crude oil

分析项目	性质	分析项目	性质
API 度	16.84	w(碳)/%	87.55
密度(20 ℃)/(kg·m ⁻³)	949.9	w(氢)/%	11.89
凝固点/℃	4	w(氮)/%	0.339 6
黏度(50 ℃)/(mm ² ·s ⁻¹)	364.8	w(Fe)/(mg·kg ⁻¹)	6.28
w(残炭)/%	6.11	w(Ni)/(mg·kg ⁻¹)	14.1
w(灰分)/%	0.039	w(Cu)/(mg·kg ⁻¹)	0.07
w(水分)/%	0.35	w(V)/(mg·kg ⁻¹)	0.56
w(硫)/%	0.220	w(Ca)/(mg·kg ⁻¹)	74.8
w(酸值)/(mg·g ⁻¹)	2.91	w(Mg)/(mg·kg ⁻¹)	6.56
w(胶质)/%	26.15	w(Pb)/(mg·kg ⁻¹)	0.03
w(饱和烃)/%	54.27	ρ(NaCl)/(mg·L ⁻¹)	8.0
w(芳烃)/%	16.08	特性因素	11.5
w(沥青质)/%	3.50	原油类别	低硫重质环烷基-中间基

秦皇岛 32-6 环烷基原油减二线馏分油性质分析,结果见表 2。

由表 2 中数据可知,秦皇岛 32-6 原油的减二线馏分油的特点是环烷烃含量较高,密度大,倾点较低,是生产冷冻机油基础油的优质原料。

1.3 加氢工艺条件的探索

冷冻机油组分中 98% 以上都是基础油,所以基础油性质的优劣直接影响冷冻机油产品的关键性质,如黏度、密度、倾点及碳型分布等。本文考察在相同加氢压力下,不同反应温度、体积空速与目标基础油黏度、倾点之间的关系。具体加氢工艺条件见表 3。

1.4 基础油性质分析

实验室对不同工艺条件下的目标加氢基础油进行性质分析,结果见表 4。

表 2 32-6 减二线馏份油理化性质
Table 2 Physical and chemical properties of 32-6 vacuum distillate

分析项目	32-6 减二线馏份油	试验方法
色度	4.0	GB/T 6540
运动黏度/(mm ² ·s ⁻¹)	40 ℃	ASTM D445
	100 ℃	
黏度指数	-37	ASTM D2270
w(氯)/(mg·kg ⁻¹)	0.1	ASTM D7536
密度(20 ℃)/(kg·m ⁻³)	945.9	GB/T 2013
闪点/℃	214	GB/T 3536
w(残炭)/%	0.02	GB/T 17144
倾点/℃	-12	GB/T 3535
凝点/℃	-15	GB/T 510
w(硫)/(mg·kg ⁻¹)	2 851.2	SH/T 0689
w(N)/(mg·kg ⁻¹)	1 192.6	SH/T 0704
w(C7 不溶物)/(mg·kg ⁻¹)	254.15	RIPP 10
w(芳烃)/%	0	
w(石蜡基)/%	46.2	SH/T 0725
w(环烷基)/%	53.8	

表 3 加氢工艺条件
Table 3 Hydrogenation process conditions

项目	D1			D2			D3		
	加氢处理	临氢降凝	加氢后精制	加氢处理	临氢降凝	加氢后精制	加氢处理	临氢降凝	加氢后精制
反应压力/MPa	15	15	15	15	15	15	15	15	15
反应温度/℃	315.0	325.9	233.6	350.0	360.7	253.0	337.7	354.8	253.1
体积空速/h ⁻¹	1.3	3.1	1.6	1.3	3.1	1.6	1.3	3.1	1.6

表 4 不同加氢工艺条件的基础油性质分析
Table 4 Property analysis of base oil under different hydrogenation conditions

分析项目		D1		D2		D3	
		10 号基础油	46 号基础油	10 号基础油	46 号基础油	10 号基础油	46 号基础油
运动黏度/(mm ² ·s ⁻¹)	40 ℃	10.81	45.60	10.23	44.91	10.21	45.73
	100 ℃	2.6	5.801	2.6	5.656	2.6	5.808
密度(20 ℃)/(kg·m ⁻³)		907.0	894.5	870.2	893.5	870.6	893.0
闪点/℃		154	192	152	196	155	210
w(芳烃)/%		7.5	0	7.5	0	7.4	0
w(石蜡基)/%		56	53.5	53.7	52.7	53.8	52
w(环烷基)/%		36.5	46.5	38.8	47.3	38.8	48
倾点/℃		－58	－24	－59	－39	－59	－36

由表 4 可以看出,反应温度对目标基础油倾点的影响显著,随着反应温度的升高,目标基础油的倾点会逐渐降低,这是由于临氢降凝反应是典型的择形裂化反应,整个过程属于强吸热反应^[7]。升高温度有利于裂化反应的进行,同时还可以提高催化剂的反应活性,能够选择性裂化更多的正构烷烃,基础油倾点降低^[8]。从表 4 可以得出,D2 操作条件生产出的 10 号和 46 号基础油的颜色、黏度、密度、闪点、倾

点以及碳型分析等物理性能均能满足产品 L-DRG10 和 L-DRA46 冷冻机油的指标要求。

2 冷冻机油的研制

以秦皇岛 32-6 减二馏份油加氢基础油为原料,加入氧化剂、抗磨剂、抗泡剂以提高冷冻机油的润滑性、化学稳定性和泡沫稳定性,研制出满足 GB/T 16630—2012 质量标准的 L-DRG10 和 L-DRA46 冷冻机油产品。

2.1 抗氧剂评选试验

冷冻机油与制冷剂共存时,在排气阀等高温部位会导致冷冻机油不断氧化变质生成积碳,同时基础油的分解产物与制冷剂发生化学反应,使制冷效果变差,生成的酸性物质腐蚀制冷机部件,故油-剂共存时的热化学安定性决定了油品的使用寿命^[9]。

2.1.1 L-DRA46 抗氧剂评选

本文选择不同类型抗氧剂 A/B,抗氧剂 A 为芳胺类化合物,抗氧剂 B 为屏蔽(受阻)酚化合物,考察 2 种抗氧剂配制的 L-DRA46 基础油在 140 ℃ 温度下静置 14 h 后氧安定性和铜片腐蚀的影响,评价结果见表 5。

表 5 抗氧剂评选结果

Table 5 Antioxidant evaluation results

抗氧剂加入量/%	抗氧剂名称	$w(\text{氧化油酸值})/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$w(\text{氧化油沉淀})/\%$	$w(\text{氧化油酸值})/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$w(\text{氧化油沉淀})/\%$	析出物生成/mg	铜片腐蚀/级
0		≥ 0.2	≥ 0.02	0.80	0.20	0	2a
0.1	抗氧剂 A	≥ 0.2	≥ 0.02	0.30	0.03	0	1b
	抗氧剂 B	≥ 0.2	≥ 0.2	0.28	0.02		
0.2	抗氧剂 B	≥ 0.2	≥ 0.02	0.22	0.010	0	1b
0.3		≥ 0.2	≥ 0.2	0.098	0.003		1a

铜片腐蚀指标为在 100 ℃, 3 h 条件下将铜片置于被测溶液中,试验过程中铜片表面受待测式样的侵蚀程度,腐蚀程度共分 4 级。①轻度变色淡橙色,几乎与新的铜片一样;②中度变色紫红色或淡红色、带有淡紫色或银色,或两种都有;③深度变色:洋红色覆盖在黄铜色上的多彩色,有红和绿显示的多彩色(孔雀绿),但不带灰色;④腐蚀,透明的黑色,深灰色或仅带有孔雀绿的棕色,石墨黑色或无光泽的黑色,有光泽的黑色或乌黑发亮的黑色。分级(1a, 1b, 2a, 2b, 2c, 2d, 2e, 3a, 3b, 4a, 4b, 4c)。

从表 5 中各项分析数据可知,在加入抗氧剂后,油品的氧化安定性得到明显改善,抗氧剂 A 和 B 在相同加剂量下,加入抗氧剂 A 时产品的酸值和油泥沉淀都高于抗氧剂 B;随着抗氧剂 B 加入量的提高,产品的酸值、油泥沉淀生成量逐渐降低。根据 GB/T 16630—2012 对氧化安定性的要求,对比抗氧剂评价结果,L-DRA46 抗氧剂方案为:抗氧剂 B,加入量为 0.3%。

2.1.2 L-DRG10 抗氧剂评选

在全封闭冰箱制冷压缩机运转工况下,油品和空气虽不发生直接接触,但在冷冻机油中添加适量抗氧剂,可有效防止油品氧化,延长其使用寿命,保证冷冻机油的运输和储存稳定性,以及在金属催化剂存在条件下的抗氧化性能。

实验室采用 175 ℃ 温度下静置 14 h 的方法,同样考察不同类型抗氧剂 A 和 B 对 L-DRG10 基础油氧化安定性的改善效果,根据氧化后油品的酸值和沉淀生成量来判断油品抗氧化性能的优劣^[10]。试验结果见表 6。

表 6 抗氧化剂评选结果

Table 6 Antioxidant evaluation results

抗氧化剂加入量/%	抗氧化剂名称	外观	$w(\text{氧化油酸值})/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$w(\text{氧化油沉淀})/\%$	铜片腐蚀/级
0		清澈透明	0.60	0	1b
0.2	抗氧化剂 A	清澈透明	0.25	0	1b
	抗氧化剂 B		0.19		
0.4	抗氧化剂 B	清澈透明	0.12	0	1b
0.6			0.044		1a

从表 6 中分析数据可知,加入抗氧化剂 A 的氧化油品其酸值高于抗氧化剂 B 的氧化油,随着抗氧化剂 B 加入量的提高,氧化油的酸值逐渐降低,铜片腐蚀更优,达到 1a。对比试验结果,L-DRG10 抗氧化剂方案为:抗氧化剂 B,加入量为 0.6%。

2.2 抗磨剂评选试验

2.2.1 L-DRA46 抗磨剂评选

为了适应节能化、小型化、轻量化和高效化发展趋势,高转速型压缩机已成为主导产品,高速运转的部件要求油品具有优异的抗磨性能^[11]。Falex 磨损试验与压缩机的实际磨损情况有较好的关联性。本文采用 Falex 磨损试验作为评价手段,考察不同抗磨剂的使用效果,评选出合适的 L-DRA46 冷冻机油抗磨剂方案。

从表 7 可知,对比不同类型抗磨剂 C,D 和 E 对基础油的改善效果,在相同比例下,加入抗磨剂 C 的 L-DRA46 油品的润滑性较 D,E 更优;以同类产品为参比,加入不同比例的抗磨剂 C,通过对 Falex 失效负荷和化学稳定性的考察,得出在加入 0.8%抗磨剂 C 后,可以提高 L-DRA 46 冷冻机油的的润滑性。并通过与市场同类产品比较(Falex 失效负荷 3 165 N),其抗磨性能远远优于市场同类产品。

2.2.2 L-DRG10 抗磨剂评选

随着碳氢制冷剂 R600a 的广泛使用及制冷压缩机小型化及高效化的发展,R600a 不能够提供足够的极压特性,同时对冷冻机油有稀释效应,降低油品的运动黏度和润滑性,因此仅靠基础油的润滑性是不够的,必须添加适量抗磨剂以提高冷冻机油的抗磨性^[12-13]。同样采用 Falex 磨损试验作为评价手段,考察不同抗磨剂的使用效果,评选出合理的 L-DRG10 冷冻机油抗磨剂方案(表 8)。

对比不同类型抗磨剂 C,D 和 E 对基础油的改善效果,在相同比例下,加入抗磨剂 C 的 L-DRG10 油品其抗腐蚀、化学稳定性和润滑性都较 D,E 更优;加入不同量抗磨剂 C,通过对 Falex 失效负荷性的考察,得出在加入 2.6%抗磨剂 C 后,可以提高 L-DRG10 冷冻机油的的抗磨性。并通过与市场同类产品比较(Falex 失效负荷 3 539 N),其抗磨性能远远优于市场同类产品。

表 7 L-DRA46 抗磨剂评选试验结果

Table 7 Selection test results of L-DRA46 antiwear agent

抗磨剂	抗磨剂添加量/%	Falex 失效负荷/N
C	0.4	2 536
	0.6	3 274
	0.8	3 512
D	0.4	1 868
E		1 879

表 8 L-DRG10 抗磨剂评选试验结果

Table 8 selection test results of L-DRG10 antiwear agent

抗磨剂	抗磨剂添加量/%	Falex 失效负荷/N
C	2.0	2 496
	2.2	2 777
	2.4	3 461
	2.6	3 745
D	2.0	1 744
E		1 758

2.3 抗泡剂评选

润滑油产生泡沫对润滑油的使用造成很大危害,大量稳定的泡沫,会使体积增大,使油品从油箱中溢出,同时增大润滑油的压缩性,使油压降低^[14-15]。本文选用 3 种不同类型的抗泡剂,采用泡沫倾向/稳定性试验进行抗泡剂的评选,试验结果见表 9。

表 9 抗泡剂评选试验结果
Table 9 Selection test results of antifoam

抗泡剂	抗泡剂加入量/%	L-DRA46			L-DRG10		
		前 24 ℃	93.5 ℃	后 24 ℃	前 24 ℃	93.5 ℃	后 24 ℃
		350/0	200/0	410/0	110/0	50/0	900/0
G	0.000 5	25/0	20/0	25/0	50/0	30/0	55/0
G	0.001 0	25/0	20/0	25/0	50/0	30/0	55/0
G	0.001 5	55/0	45/0	75/0	60/0	45/0	65/0
F	0.000 5	30/0	25/0	30/0	80/0	40/0	70/0
H	0.000 5	55/0	45/0	75/0	60/0	45/0	65/0

从表 9 可知,在加入抗泡剂 F,G,H 后,成品油的泡沫性能都能够得到改善,其中抗泡剂 G 的使用效果最佳,当加入量提高到 0.001 5%时,L-DRA46 和 L-DRG10 油品的泡沫稳定性效果最佳。

3 L-DRA46 和 L-DRG10 冷冻机油
产品试制

通过以上研究表明,本文选择 D2 的加氢组合工艺条件下生产的 10 号和 46 号加氢润滑油作为 L-DRA46 和 L-DRG10 冷冻机油基础油,并确定了两种代表冷冻机油的产品方案,结果见表 10。

从表 10 可知,L-DRA46 冷冻机油的添加剂配方:抗氧剂 B 加入量 0.3%,抗磨剂 C 加入量 0.8%,抗泡剂 G 加入量 0.001 5%;L-DRG10 冷冻机油的添加剂配方:抗氧剂 B 加入量 0.6%,抗磨剂 C 加入量 2.6%,抗泡剂 G 加入量 0.001 5%,油品性质见表 11 及表 12。

按照实验室研制方案调制的 L-DRA46,L-DRG10全封闭冷冻机油产品其理化性质完全满足GB/T16630—2012 质量指标,并较同类产品低温流动性、低温析蜡倾向、化学稳定性和抗磨性能更优。

表 10 冷冻机油产品方案

Table 10 Refrigeration oil product solution

添加剂	加入量/%	
	L-DRA46	L-DRG10
抗氧剂 B	0.3	0.6
抗磨剂 C	0.8	2.6
抗泡剂 G	0.001 5	0.001 5

表 11 L-DRA46 成品油性质

Table 11 Properties of L-DRA46 product oil

分析项目	质量指标	L-DRA46	同类产品
颜色/号	≠1.5	<0.5	<0.5
运动黏度(40 ℃)/(mm ² ·s ⁻¹)	41.4~50.6	46.91	45.78
密度(20 ℃)/(kg·m ⁻³)	≠890.0	893.5	892.4
铜片腐蚀(T ₂ 铜片 100 ℃,3 h)/级	≠1	1a	1a
闪点(开口)/℃	≠160	196	195
倾点/℃	≠-33	-39	-36
w(水分)/(mg·kg ⁻¹)	≠30	15	20
击穿电压/kV	≠25	43.7	42.1
w(酸值)/(mg·g ⁻¹)	≠0.02	<0.01	<0.01
前 24 ℃	≠50/0	20/0	30/0
93.5 ℃	≠75/0	20/0	25/0
后 24 ℃	≠50/0	20/0	35/0
极压性能(法莱克斯法)	≠3 000	3 524	3 165
失效负荷/N			
w(氧化油酸值)/(mg·g ⁻¹)	≠0.2	0.04	0.12
w(氧化油沉淀)/%	≠0.02	<0.01	0.01

表 12 L-DRG10 成品油理化性质
Table 12 Properties of L-DRG10 product oil

分析项目	质量指标	L-DRG10	同类产品
运动黏度(40 ℃)/(mm ² ·s ⁻¹)	9.0~11.0	10.23	10.34
密度(20 ℃)/(kg·m ⁻³)	≦960.0	970.2	971.7
闪点(开口)/℃	≧150	152	150
倾点/℃	≧-45	-59	-53
铜片腐蚀(T ₂ 铜片 100 ℃,3 h)/级	≦1	1a	1a
絮凝点(R600a)/℃	≧-42	-60	-55
X(水分)/(mg·kg ⁻¹)	≦30	8	10
击穿电压/kV	≧25	52.1	49.4
X(酸值)/(mg·g ⁻¹)	≦0.2	0.08	0.1
前 24 ℃	≧50/0	20/0	25/0
93.5 ℃	≧75/0	15/0	2/0
后 24 ℃	≧50/0	25/0	30/0
极压性能(法莱克斯法)			
失效负荷/N	≧3 000	3 782	3 539
颜色	—	≦0.5	≦0.5
析出物生成/mg	无沉淀	无沉淀	0.008

4 结 论

1) 以秦皇岛 32-6 减二馏份油为原料,采用加氢组合工艺生产的基础油是生产 L-DRA46 和 L-DRG10冷冻机油的优质原料。

2) 通过对不同功能剂的评选,研制出满足 GB/T 16630—2012 中质量标准的 L-DRA46 和 L-DRG10冷冻机油产品,与同类品牌产品质量相当。

参考文献:

[1]谢泉. 润滑油品研究与应用指南[M]. 北京:中国石化出版社,2007: 287-285.

[2]温海军,姚荣茂,陈炳耀,等. 冷冻机油基础知识与应用[J]. 山东工业技术,2018, 31(15): 27-28.

[3]马文志. 环烷基高压加氢技术的应用[J]. 山东化工,2015, 44(9): 113-116.

[4]储宇,金月昶,王海彦. 环烷基加氢生产润滑油技术发展[J]. 当代化工,2010, 39(3): 261-264.

[5]王启升,王娟,朱长申,等. 环烷基减压渣油生产光亮油技术研究[J]. 润滑油,2019, 34(4): 50-54.

[6]冯江欣. 秦皇岛 32-6 油田优势通道定量评价研究[D]. 重庆:重庆科技学院,2015.

[7]梁文杰. 石油化学[M]. 青岛:石油大学出版社,1996: 313-440.

[8]高丽,马向荣,王延臻,等. 加氢裂化尾油临氢降凝催化剂的制备及其性能评价[J]. 石油炼制与化工,2019, 50(4): 39-43.

[9]王顺顺,赵笑生,李光萍. 浅谈如何正确管理工业润滑油延长设备使用寿命[J]. 石油商技,2019, 2(3): 76-78.

[10]李潘源. 冷冻机油关键技术指标及评价方法综述[J]. 合成润滑材料,2018, 5(1): 24-27.

[11]孙令国. 极压抗磨剂的种类及作用机理[J]. 合成润滑材料,2016, 43(3): 29-34.

[12]范丰奇,王将兵,周旭光. 不同极压抗磨剂的研究发展[J]. 润滑油,2018, 33(4): 30-35.

[13]谢恩情,赵昕楠,张云海,等. 润滑油极压抗磨添加剂应用研究进展及方向[J]. 煤炭与化工,2013, 36(1): 25-27.

[14]马占胜. 抗泡剂对润滑油理化性能的影响[J]. 化工管理,2016, 11(2): 120-121.

[15]焦志凌,于凯成,张磊. 抗泡剂在工业润滑油中的应用研究[J]. 润滑油,2015, 30(5): 50-53.

(责任编辑:殷丽莉)