DOI: 10.3901/JME.2014.23.112

含氮硼蓖麻油聚氧乙烯醚水溶液的摩擦学特性

何建国^{1,2} 张朝辉¹ 刘思思¹ 周杰¹ 凡炼文¹

(1. 北京交通大学机械与电子控制工程学院 北京 100044;

2. 中国科学院光电研究院 北京 100094)

摘要: 聚醚水溶液是水基润滑液的重要研究方向之一。为改善水的摩擦学性能,选取蓖麻油聚氧乙烯醚系列中的EL-60(Cremophor EL-60)和三乙醇胺硼酸酯(Boric acid triethanolamine, BN)作为添加剂,并对相关溶液进行对比分析研究,同时对两种物质对水溶液摩擦学特性的影响进行了一定论述。EL-60是一种性能良好的表面活性剂,能够充分吸附在金属表面,形成牢固的润滑分子层;BN具有良好的极压性能和防锈性能。配置EL-60水溶液及两种物质混合质量比为1:1的BN-EL-60水溶液,利用MRS-10A型四球试验机对EL-60水溶液以及BN-EL-60水溶液进行减摩抗磨性能试验与极压性能试验、防锈特性研究等。结果表明BN-EL-60溶液在高负荷情况下具有一定性能优势,而低负荷情况EL-60单质溶液则相对优秀;较低浓度的溶液就已经具备较好的减摩抗磨综合性能;加入BN之后溶液的摩擦因数随时间的变化波动增大,溶液摩擦学性能稳定性相对变差;另外,BN的引入能够大大提升溶液的极压性能和防锈性能。BN与EL-60的协同效应并非是单纯协同增效,其性能是随工作负荷的变化而改变的,总体而言,EL-60与BN-EL-60是一类具有良好应用前景的水溶液润滑添加剂。

关键词: 水基润滑液;减摩抗磨;极压防锈;蓖麻油聚氧乙烯醚;三乙醇胺硼酸酯

中图分类号: TH117

Tribological Properties of Cremophor EL Aqueous Solutions Containing Nitrogen and Boron

HE Jianguo^{1,2} ZHANG Chaohui¹ LIU Sisi¹ ZHOU Jie¹ FAN Lianwen¹

(1. School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044;

2. Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094)

Abstract: Polyether aqueous solution is one of the important research in water-based lubricant. Cremophor EL-60 is an excellent surfactant, it can fully adsorb on the metal surface, and forming firm lubricant molecular layer. Boric acid triethanolamine (BN) has excellent extreme pressure properties and anti-rust properties. Mixing the two additives in mass ratio of 1:1, there is the BN-EL-60 water-based lubricant. Anti-friction and anti-wear performances of EL-60 aqueous solutions and BN-EL-60 aqueous solutions is studied by MRS-10 four ball tester, so as to the performances of extreme pressure, anti-rust, etc. It is showed that the BN-EL-60 aqueous solutions have a better performances at high load and high rotating speed, and at normal conditions EL-60 aqueous solutions are better. The two series have a good anti-friction and anti-wear performances at low concentration; after bringing BN into the solutions the friction coefficient fluctuation becomes unstable, but it can also obviously improve the extreme pressure performances and anti-rust performances. The synergistic behavior of BN and EL-60 additives are not simply, its characteristics are changing with the working conditions. Overall, EL-60 and BN-EL-60 additives are kinds of water-soluble additives with good application prospects.

Key words: water-based lubricant; anti-friction and anti-wear; extreme pressure and anti-rust; cremophor EL; boric acid triethanolamine

0 前言

聚醚(一种嵌段复合物)又称聚乙二醇醚^[1],是表面活性剂产品中的佼佼者,在金属加工液产业中具有重要的地位,也是水基润滑液领域研究的重要方

向之一。由于它的表面活性,具备强劲的界面润湿能力和吸附力,因而能够在金属表面形成牢固的润滑吸附膜,能够起到抗磨的作用。聚醚的黏度大于一般的油基基础油,而其低浓度的水溶液黏度较低,运行过程中的黏度较为稳定,在工作时剪切力处于较低的水平,这对减摩性能有着重要作用^[2-3]。聚醚的黏度特性随着聚醚相对分子量的增加而增大,较

高的黏度有助于形成更加稳定的物理吸附膜和流体润滑膜,能够在某些情况下提高润滑系统的综合性能。文献[4]在聚氧乙烯基醚水基润滑液摩擦学特性研究中详细分析了四种聚氧乙烯基醚在水溶液中的摩擦学性能,并从动力黏度、成膜性能、减摩抗磨性能几个方面进行了综合分析,证明四种聚醚中蓖麻油聚氧乙烯醚 EL-40 在水溶液中的减摩抗磨性能较为优秀、成膜能力较强,是一种性能优秀的水基润滑添加剂。

有机硼酸酯是一类多功能添加剂^[4]。含硼表面活性剂的分子中一般具有 B-O 键,且为非离子型,沸点很高,高温下稳定,具有较好的抗菌性能,是一种无毒、无公害、易合成,具有杀菌、防腐、抗磨能力的性能优秀的新型表面活性剂,并且近年来的研究已经很好地解决了水解的问题^[5, 7-12],避免了其水解现象对水基润滑液性能负面影响的出现。胡志孟^[6]在一种新型的水溶性有机硼化合物润滑和防锈添加剂中提到一种性能优秀的水基添加剂,其 P_B 值为 784 N,在 196 N 的四球机长磨试验下,钢球的磨斑直径为 0.41 mm,同时还进行了防锈、防腐、大白鼠急性毒性试验等,充分证明了含氮硼有机化合物添加剂是一种具有发展前途的优秀添加剂。

为提高水的摩擦学性能,需要解决水的低黏度成膜难、界面润湿能力相对较差、容易使浸入其中的金属发生锈蚀等几类问题。本文总结了聚醚类水基润滑液及含硼添加剂研究领域的相关成果,选取聚氧乙烯基醚系列中相对分子量较高的蓖麻油聚醚与不水解的含氮硼化合物作为水基润滑添加剂,以期所配置的溶液具备二者优点,并出现协同增效情况。由于两物质不会发生化学反应,性质相对稳定,不易出现竞争吸附,在水溶液中能够发挥各自的性能优势。本文所得的研究结果能够一定程度揭示两种物质对水溶液摩擦学特性的影响,帮助形成一类具备易成膜、膜性能优秀、黏度适中、极压性能良好,抗菌、绿色环保的新型水基润滑液。

1 试验设备和试验方案

1.1 添加剂的选择

EL-60 是蓖麻油聚氧乙烯基醚系列中相对分子量较高的表面活性剂物质,分子极性较强,分子链长,能够充分吸附在摩擦副表面,形成牢固的润滑分子层,为摩擦副提供良好的润滑性能。考虑到 EL-60 是一种有容易被分解处理的机高分子聚合物,符合环境友好型的要求,同时它也能用于日化和制药领

域,是一种环境兼容性和人体兼容性极佳的表面活性剂,能够有效解决水基润滑液的处理与日常管理问题,满足人们对绿色环保的需求。

BN,即三乙醇胺硼酸酯,是含氮硼酸酯中一种热稳定性良好,不发生水解的硼酸酯类添加剂,它含有硼元素,在极端负荷下能够与表面物质生成硼氧化物,形成致密的氧化保护膜或是硼的渗透层,起到增强润滑和保护表面的作用^[9, 13-14];由于它的碱度较高,因而是一种良好的 pH 值稳定剂,特别是对于以水为基础的水基润滑液来说,它是一类性能良好的极压防锈添加剂。

添加剂选取蓖麻油聚氧乙烯基醚 EL-60 与三乙醇胺硼酸酯(BN)作为添加剂,配置了 EL-60 单质溶液与 BN-EL-60 溶液,浓度共八种,分别为 0.5%、1%、5%、10%、15%、20%、25%、30%。采用去离子水溶解溶质,静置 20 min 后,利用双向磁力搅拌机搅拌 30 min,静置 2 h,观察溶液是否出现分层。在所配置的溶液中,由于添加剂对水的溶解性均为易溶,因此溶解较快,且溶解后不会出现分层,浓度越大,溶解越慢。

1.2 试验设备与试验方案

试验设备选取由济南试金集团生产的 MRS-10A 型四球试验机对所配置的溶液进行减摩抗磨性能与极压性能研究。

试验分四部分,前三部分主要考察溶液的减摩抗磨性能,分别以浓度为变量、以载荷为变量、以转速为变量,从三方面考察溶液性能;第四部分考察溶液的极压性能。其中试验从以浓度为变量的系列试验中选取 1%浓度的溶液作为后续试验的研究对象。

2 试验结果与讨论

2.1 两溶液减摩抗磨性能分析

2.1.1 浓度对减摩抗磨性能的影响

该组试验的试验条件:载荷 200 N,转速 1 435 r/min,时间 30 min,浓度从 0.5%变化至 30%。

从图 1 和图 2 中的数据可以看出,无论是 EL-60 溶液还是 BN-EL-60 溶液在都在较低的浓度下就已经具备了较好的减摩抗磨性能,两溶液的摩擦因数均随浓度的增加而下降至最低点,此后浓度继续升高则溶液的黏度增加,黏度所带来的内切应力的提高使溶液宏观表现出摩擦因数增加。

如图 2 所示,两溶液的磨斑直径曲线截然相反,EL-60 溶液磨斑直径随浓度的上升有一定下降,但下降幅度不大,而 BN-EL-60 溶液的磨斑直径随浓

度的上升而不断变大, 最终稳定在 0.85 mm 左右。

图 1 两种溶液不同浓度的摩擦因数曲线

图 2 两种溶液不同浓度的磨斑直径曲线

因此, 图 1 与图 2 的结果可以说明低负荷情况下, BN-EL-60 的减摩抗磨性能在所有浓度全面低于 EL-60, 其中两溶液的摩擦因数随浓度变化均先下降后升高, 而抗磨性能则变化单调, BN 组分越大, 抗磨性能越差。

由于 BN 水溶液的黏度很低, 含有 BN 的溶液整体黏度下降, 加之 EL-60 组分减少、两种物质在溶液中发生竞争吸附现象, 因而 BN-EL-60 溶液在低负荷情况下, 无论是吸附膜还是流体膜强度均有降低, BN-EL-60 溶液低负荷情况下性能相对较差。

考虑到水基润滑液大量应用于金属加工领域, 其特点为用量大、浓度低、成本低等, 因此选择 1% 浓度的两溶液进行后续研究。

2.1.2 载荷对减摩抗磨性能的影响

该组试验的试验条件: 浓度 1%, 转速 1 435 r/min, 时间 30 min, 载荷从 200 N 变化至 900 N。

从图 3 可以看出, 低载荷下 1%EL-60 溶液摩擦因数较 1%BN-EL-60 低, 差距较大, 后者摩擦因数较前者升高约 80.2%, 这与前述以浓度为变量时的结果基本相符, 低载荷下 1%EL-60 溶液性能优势明显。随着载荷的增加, 1%EL-60 溶液摩擦因数的变化趋势为随载荷增加而增加, 而 1%BN-EL-60 溶液摩擦因数一直在下降, 400 N 左右时出现拐点,

1%EL-60 溶液摩擦因数由之前的上升, 开始转为下降, 相对 1%BN-EL-60 溶液摩擦因数的优势逐步减小, 并且开始呈现相同的变化趋势。中等载荷之后两者减摩性能基本相同, 趋势为逐步下降, 最终两者都在 0.077 左右。整体而言, 两溶液减摩性能变化趋势不同, 低载荷下 1%EL-60 溶液强于 1%BN-EL-60 溶液, 中高载荷时 1%BN-EL-60 溶液性能提升, 并逐步超过 1%EL-60 溶液最高达 5.3%, 平均为 2.4%。

图 3 1%浓度两种溶液的摩擦因数随载荷的变化曲线

从图 4 可以看出, 两种溶液磨斑直径逐渐上升, 其中 1%EL-60 溶液上升较快, 而 1%BN-EL-60 变化平缓、性能稳定。中等载荷(600 N 左右)前 1%EL-60 溶液磨斑直径低于 1%BN-EL-60 溶液, 而载荷继续增加之后, 1%BN-EL-60 溶液性能优势开始体现, 最高优势达 36.8%。1%EL-60 溶液磨斑直径在 0.548 5~1.121 5 mm 之间, 1%BN-EL-60 磨斑直径在 0.623 3~0.708 3 mm 之间。整体而言, 中等载荷(600 N 左右)以上的平均磨斑直径, 1%BN-EL-60 溶液抗磨性能较 1%EL-60 溶液提升近 17.85%。

图 4 1%浓度两种溶液的磨斑直径随载荷的变化曲线

综合分析图 3 与图 4, 可以得到以下结论, 1%BN-EL-60 溶液在低载荷下摩擦磨损性能相对较差, 在中高载荷下混合物中的 BN 开始发挥极压剂的作用, 优化溶液的摩擦磨损性能。

2.1.3 转速对减摩抗磨性能的影响

该组试验的试验条件: 载荷 200 N, 浓度 1%, 时间 30 min, 主轴转速从 835 min 变化至 1 840 r/min。

从图 5 中曲线可以看出, 1%EL-60 溶液减摩性能较 1%BN-EL-60 溶液优势明显, 1%EL-60 溶液摩擦因数在 0.079 02~0.090 41 之间变化, 而后的摩擦因数在 0.102 73~0.116 20 之间变化。整体而言, 1%EL-60 溶液减摩性能较 1%BN-EL-60 溶液最大提升 47.05%, 平均减摩性能提升 29.64%。在转速为 1 435 r/min 时出现拐点 1%EL-60 溶液由前面摩擦因数上升的趋势变为下降, 1%BN-EL-60 溶液由前面摩擦因数下降的趋势变为上升。

图 5 1%浓度两种溶液的摩擦因数随转速的变化曲线

从图 6 中可以看到, 两溶液磨斑直径变化趋势完全不同, 1%EL-60 溶液磨斑直径随转速的上升而上升, 在 1 760 r/min 至 1 840 r/min 时, 摩擦因数出现下降的情况; 而 1%BN-EL-60 溶液磨斑直径波动下降最终稳定在 0.605 mm。

图 6 1%浓度两种溶液的磨斑直径随转速的变化曲线

1%BN-EL-60 溶液磨斑直径在 0.591 7~0.660 0 mm 之间变化, 在低、中转速下抗磨性能较 1%EL-60 劣势很大, 最大达 40.45%, 整体抗磨性能平均降低 19.24%。在中等转速之后两溶液的抗磨性能逐渐接近, 在 1 600 r/min 左右, 1%BN-EL-60 溶液性能超过 1%EL-60 溶液, 超过最大达 6.1%, 说明

1%BN-EL-60 溶液性能在中、高转速时较好。

2.2 两溶液极压性能分析

根据 GB/T12583-1998《润滑剂极压性能测定法》^[15], 利用四球试验机进行 EL-60 和 BN-EL-60 水溶液的极压性能测试。试验条件: 转速为 1 760 r/min, 时间为 10 s, 结果归纳见表 1。

表 1 极压性能试验结果			N
不同浓度的溶液	最大无咔咬负荷		
	EL-60 溶液	BN-EL-60 溶液	
	$P_B(\text{EL-60})$	$P_B(\text{BN-EL-60})$	
1%	543	849	
10%	834	1 137	

结果显示, BN 的引入大大增加了聚醚水溶液的极压性能, 在所体现的数据中可以看到 1%浓度的 BN-EL-60 溶液较同浓度的 EL-60 溶液极压性能提升 56.4%, 10%浓度的 BN-EL-60 溶液较同浓度的 EL-60 溶液极压性能提升 36.3%; 另外, 发现浓度增加, 同样能够很好地提升水溶液自身的极压性能, 其中 EL-60 溶液 10%浓度较 1%浓度极压性能提升 53.6%, 而 BN-EL-60 溶液 10%浓度较 1%浓度极压性能提升 33.9%。

通过极压性能分析, 能够发现含有 BN 的溶液, 其极压性能十分优秀, P_B 大于一般市售的水基极压抗磨剂^[9]。由于两种物质的化学性质相对稳定, 在溶液中不发生相互反应, 因此所提高的极压性能很大程度上由 BN 所提供, 极压性能是考验溶液在极端条件下的承载能力, 此时流体润滑膜以及物理化学吸附膜已经被破坏, 极压剂其主要作用, 前文提到 BN 在金属表面生成致密氧化反应膜或渗透膜, 可以证明 BN-EL-60 混合溶液中, 极端摩擦条件下, BN 作为极压抗磨剂体现出了它的优秀性能, 使该型含氮硼聚醚溶液具备了优秀的极压性能, 拓展了溶液的应用范围。

2.3 防锈性能

防锈性能试验选取减摩抗磨性能试验中所留下的废液与钢球作为分析对象, 分别讨论了溶液在低负荷、高载荷、高转速三种试验条件下的防锈性能, 如图 7~9 所示。从中可以发现无论是 0.5%浓度低负荷, 还是 1.0%浓度高载荷, 还是 1.0%浓度高转速, 三种情况下含有 BN 溶质的溶液都具备相对优秀的防锈性能。

其中, 从图 7 的四幅图片可以看出, 废液颜色变浅, 另外钢球表面氧化物明显减少甚至消失; 从图 8 的两幅图片则能够十分明显地发现, 在没有 BN 溶质的时候溶液呈现为赤铁矿的颜色, 说明溶液中悬浮的金属切削颗粒物已经被氧化为 Fe_2O_3 , 而引

入 BN 后,发现溶液颜色明显变浅虽然有一些浑浊,但溶液中的漂浮物并没有严重氧化,证明 BN 能够极大地提高溶液的防锈性能;从图 9 的两幅图片同样能够发现,引入 BN 的溶液其工作废液颜色较浅。

图 7 0.5%浓度两种溶液低负荷(载荷 200 N、转速 1 435 r/min)情况下的废液与钢球表面

图 8 1%浓度两种溶液高载荷(载荷 900 N、转速 1 435 r/min)情况下的工作废液

图 9 1.0%浓度两种溶液高转速(载荷 200 N、转速 1 435 r/min)情况下的工作废液

分析以上试验结果,较好地印证了前文所述的关于 BN 防锈性能的内容,从对比分析能够发现,引入少量的 BN 到溶液中就能够起到很好的防锈性能,同时更高浓度的 BN-EL-60 能够具备更好的防锈特性。

2.4 稳定性能

图 10 与图 11 为 EL-60 与 BN-EL-60 溶液的摩擦因数随时间变化曲线,从中发现极低浓度的润滑液稳定性极差,这是由于在低浓度时润滑液分子不

能很好地吸附在摩擦副表面,同时溶液较低的黏度使薄膜润滑中流体膜的性能很不稳定;高浓度时虽然润滑膜强度较大,且摩擦副表面吸附达到饱和,但稳定性同样处于一个较差的级别,在高浓度情况下主要的润滑因素应该是较强的流体膜和表面有序吸附膜的作用,然而作为水基润滑液,在工作过程中必定伴随着挥发和摩擦化学反应,再考虑到聚醚溶液的逆溶特性,能够知道浓度越大,挥发、摩擦化学、逆溶等因素的基数越大,因而其影响能力就越大。伴随着挥发,高浓度溶液的浓度和黏度变化率将超过低浓度的溶液,高浓度的聚醚溶液在逆溶情况下所析出的物质也大大多于低浓度的溶液所析出的物质。因此,在实际考虑水基润滑液浓度的时候,浓度一定不能太低,以避免溶液的润滑性能较差,同时也不能太高,以避免溶液的稳定性较差。

图 10 EL-60 系列溶液的摩擦因数随时间的变化曲线

图 11 BN-EL-60 系列溶液的摩擦因数随时间的变化曲线

为详细分析两溶液的稳定特性,对溶液的摩擦因数求取标准差,表征当次试验摩擦因数的波动特性,能够更好地分析溶液的稳定性能,见图 12。

从图 12 中可以看出, BN-EL-60 溶液在所有浓度下,稳定性能均较 EL-60 溶液差,两溶液在 10% 浓度时稳定性能最接近,且都为所有浓度中的最小

值, 说明溶液在 10% 浓度时稳定性能最好。

图 12 两种溶液摩擦因数标准差随浓度的变化曲线

含有 BN 的溶液, 在四球试验机试验过程中会不断有晶体状物质析出, 观察发现是三乙醇胺硼酸酯 BN 的晶体。考虑到 BN 晶体的不断出现以及其在溶液中与溶液所形成的固液二相流的作用, 溶液的整体性质必定是随 BN 晶体析出而变化的。至于溶液变化的规律, 由于固液二相流的影响以及试验溶液所处的复杂环境, 该规律无法预测, 也正因为如此, 含有 BN 的溶液的稳定性较差且规律随机。

3 结论

(1) BN-EL-60 溶液在高负荷情况下的减摩抗磨性能更强, 而在低负荷情况下 EL-60 溶液性能更好, 较低浓度的两溶液已经能够提供很好的减摩抗磨性能。

(2) BN 的引入能够大大提升溶液极压性能与防锈性能, 但其在溶液中的组分应适当, 以免润滑性能损失太多。

(3) 含有 BN 的溶液会因为溶质析出, 稳定性下降, 两种溶液在 10% 浓度时的稳定性能最好。

(4) 所选添加剂方案能够改善水的摩擦学特性, 且具有一定防锈性能, 有望成为一类性能优秀的环境友好型水基润滑液添加剂。

参 考 文 献

- [1] 张康夫, 王余高, 屠伟刚, 等. 水基金属加工液[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
ZHANG Kangfu, WANG Yugao, TU Weigang, et al. Water-based metalworking fluids[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.
- [2] 李茂生. 水溶性聚醚在金属加工液中的应用[J]. 合成润滑材料, 2003(30): 8-10.
LI Maosheng. Application of water-soluble PAGs in

Metalworking fluids[J]. Synthetic Lubricants, 2003(30): 8-10.

- [3] 孙跃涛, 张朝辉, 刘思思. 月桂酸无规共聚醚水溶液减摩抗磨性能试验研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(23): 125-129.
SUN Yuetao, ZHANG Chaohui, LIU Sisi. Study on Friction-reducing and anti-wear performances of lauric acid random copolyether aqueous solutions[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(23): 125-129.
- [4] 刘俊铭. 聚氧乙烯基醚水基润滑液摩擦学特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
LIU Junming. Study on tribological properties of water-based lubricants with polyethoxylate ether added[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.
- [5] 胡晓兰, 梁国正. 硼酸酯水解稳定性研究与应用[J]. 材料导报, 2002, 16(1): 58-60.
HU Xiaolan, LIANG Guozheng. Hydrolytic stability of borate ester and its application[J]. Materials Review, 2002, 16(1): 58-60.
- [6] 胡志孟. 一种新型的水溶性有机硼化合物润滑和防锈添加剂[J]. 材料保护, 2000, 33(4): 47-48.
HU Zhimeng. An investigation on water based organic boride for lubricating and rust resisting[J]. Materials Protection, 2000, 33(4): 47-48.
- [7] 胡晓兰, 梁国正. 硼酸三乙醇胺酯的合成及表征[J]. 高分子材料科学与工程, 2004, 20(2): 69-72.
HU Xiaolan, LIANG Guozheng. Synthesis and properties of reactive borate ester as coupling[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2004, 20(2): 69-72.
- [8] WILLIAM E O. Lubricant compositions containing stable boric acid suspension: United States, 0015105[P]. 2011-01-20.
- [9] 黄文轩. 润滑剂添加剂性质及应用[M]. 北京: 中国石化出版社, 2012.
HUANG Wenxuan. Lubricant additives properties and applications[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2012.
- [10] ZHENG Zhi, SHEN Guangqiu, WAN Yong, et al. Synthesis hydrolytic stability and tribological properties of novel borate esters containing nitrogen as lubricant additives[J]. Wear, 1998(9): 135-144.
- [11] YANG Honggang, ZHANG Jia, YE Meng. Research on the performance of an eco-friendly nitrogen organic boric acid ester antirust additive[J]. Advanced Materials Research, 2012, 399: 1348-1351.
- [12] WANG Yonggang, CHU Xijie, HE Zhongyi, et al.

- Tribological performance of borate ester containing heterocyclic group and disulfides group[J]. *Lubrication Engineering*, 2010, 35(9): 36-39.
- [13] LIEHPAO F O, ANDREW H G. Amine-containing hindered phenolic antioxidant lubricant additives and compositions thereof: United States, 5169547 [P]. 1992-12-08.
- [14] ANDREW H G. Borated diol-phenol sulfide product and lubricant compositions containing same: United States, 4906390 [P]. 1990-03-06.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 12583-1998 润滑剂极压性能测定法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 12583-1998 lubricants-determination of extreme pressure properties-four ball method[S]. Beijing: China Standard Publishing House, 1995.

作者简介: 何建国, 男, 1988 年出生。主要研究方向为精密制造与摩擦学。

E-mail: hejianguo@aoe.ac.cn

张朝辉(通信作者), 男, 1972 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为精密制造与摩擦学。

E-mail: zhhzhang@bjtu.edu.cn