

The Nano-Diamond Lubricant of Excellent Performances

Wengang Zhang, Shuda Zhang

Tianjin Chanyu Superhard Sci-Tech. Co., LTD., Tianjin
Email: cnchanyu@163.com

Received: Feb. 6th, 2018; accepted: Feb. 20th, 2018; published: Feb. 28th, 2018

Abstract

The superiority of nano-diamond as extreme pressure anti-wear agent is introduced with informative data. Engine bench tests show that power, economy, emissions, cleanliness and sediment were significantly improved. Steel wear can be reduced by 82%. Oil film carrying capacity can be substantially increased. Frictional power consumption and oil temperature were significantly reduced. Mechanical transmission efficiency was enhanced. Nano-diamond engine oil does have self-repair function for the friction pairs.

Keywords

Nano-Diamond, Lubricant, Performances, Friction-Wear, Self-Repair

性能优异的纳米金刚石润滑油

张文刚, 张书达

天津乾宇超硬科技股份有限公司, 天津
Email: cnchanyu@163.com

收稿日期: 2018年2月6日; 录用日期: 2018年2月20日; 发布日期: 2018年2月28日

摘 要

用翔实的数据介绍了纳米金刚石作为极压抗磨剂的优越性。发动机台架试验表明, 动力性、经济性、排放性、清净性和沉积物等均明显改善。钢磨损量可减少82%, 油膜承载能力大幅提高, 摩擦功耗和油温明显降低, 传动机械效率提高, 对摩擦副确有自修复功能。

关键词

纳米金刚石, 润滑油, 性能, 摩擦磨损, 自修复

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

当前流行的润滑剂中有个致命的弱点, 正如两院院士侯祥麟在其专著中明确指出的: “在负荷较高的设备中, 必需加入活性较多的极压抗磨剂。但在高温下比较稳定的化合物往往极压抗磨性差; 而极压抗磨性好的化合物, 易在高温下分解, 破坏基础油的稳定性, 腐蚀金属” [1]。实际上用现流行的有机化工的办法欲大幅减少摩擦磨损已经潜力不大, 必须另辟蹊径。纳米微粒的加入使我们看到了新的曙光。

已公开发表的纳米微粒有多种, 大致可分为如下几类。纳米软金属, 如 Cu、Al、Sn、Pb、Ag 单质或其混合物等[2] [3] [4] [5]; 纳米金属氧化物或硫化物, 如 Al_2O_3 、 TiO_2 、 ZrO_2 、 MoS_2 、ZnS、PbS、CuS 等[6] [7] [8]; 无机金属硼酸盐、磷酸盐、钛酸盐、碳酸盐, 如 LaPO_4 、 CaCO_3 、 CoCO_3 、 CaTiO_3 等[9] [10] [11]; 纳米陶瓷, 如 SiC、 SiO_2 、 Si_3N_4 、AlN 等[12] [13]。此外, 还有多种上述纳米颗粒的混合物[14] [15] [16]。上述多种纳米材料加入油中均有不同程度的减摩抗磨效果, 但目前基本处于实验其性能阶段。它们的制造尚未达到产业化, 加入的浓度约为 10^{-2} ~ 10^{-3} 量级, 因而目前成本较高, 难于推广。此外, 有的长期使用还有副作用。例如铜等软金属加在发动机油中, 会在发动机的汽缸壁上涂镀上一层软金属。随着工作时间的延长, 镀层会渐厚, 有时会脱落, 从而影响发动机的正常工作。

本工作独辟蹊径, 将可以批量制造的纳米金刚石作为润滑油中的最佳极压抗磨剂, 使润滑油的油膜承载能力成倍提高, 减摩抗磨减振降噪作用明显。

2. 纳米金刚石发动机油节能减排

用负氧平衡法(爆轰法)制造的纳米金刚石已可产业化批量生产, 其平均粒径仅有 2~6 nm, 是目前最佳的极压抗磨剂。纳米金刚石发动机油可使发动机的动力性、经济性和排放性均得到改善, 降低噪声, 延长使用寿命[17] [18] [19] [20]。纳米金刚石润滑油的奇特功效无与伦比, 此问题已经引起国际学术界的高度重视。实用的瓶颈在于如何使纳米金刚石在润滑油中悬浮。由于悬浮问题极难解决, 故往往只能制成添加剂。美国自然科学基金评审委员会特请我国某大学教授评审纳米金刚石在油中的悬浮问题是否应立项。确凿信息 8 个发达国家欲联手攻关, 当然不包括中国。

经我们采用特殊的表面改性工艺后, 可使纳米金刚石在油中稳定悬浮 2 年以上。它使发动机的动力性、经济性和排放性均得到明显改善, 其加入的浓度仅为 $2 \cdot 10^{-3}$ 量级以下即可出现明显的减摩抗磨减振降噪效果。

早在 10 多年前我们就做了台架试验[21]。经中国人民解放军军事交通学院汽车实验中心的汽油机台架测试表明: 本品可使发动机功率在高转速 2700 r/min 时由 83.4 kw 增至 88.8 kw; 燃油消耗率在低转速 1600 r/min 时由 364.09 g/kw·h 降至 344.92 g/kw·h; 怠速排放 HC 由 875 ppm 降至 350 ppm, NO_x 由 166 ppm 降至 132 ppm; 气缸压力由 4.5 kgf/cm^2 提高到 5.8 kgf/cm^2 。节能指标超越国家标准: 合理润滑技术则

GB/T 13608 中 II 级(最高级)节能润滑剂指标(节能 2.7%)。

为便于运输和出口,我们研制了纳米金刚石发动机油精。将其作为发动机油添加剂按 2%~5%加入到市售的发动机油中即可起到纳米金刚石发动机油的奇特功效。经机械工业内燃机油品检验评定中心检验,它可使发动机动力性、燃油经济性、清净性和沉积物等都有明显改善。为加速试验进程,特按体积比 4%将油精加入到壳牌 CH-4 15W/40 发动机油中,对柴油机进行 100 h 对比试验。具体数据见表 1。

此外,低温启动符合国标。依据 GB/T1147.2-2007 在-30℃的低温环境下,柴油机停机静放 12 小时。在未使用其他辅助手段的情况下,经试验该柴油机在 11 秒内启动三次,能够 2 次成功,符合试验大纲要求。

实用案例 1: Z12V-190 柴油发电机组额定功率 882 kW,油温 75℃,加入纳米金刚石油精后,油温降至 72.5℃;柴油消耗率由 225.25 g/kW·h 降至 210.72 g/kW·h。

实用案例 2: 车号牌:京 FP3969,切诺基 BJ7250EA,排量 2.5 升,手动,已行驶 73,442 km,登记日期 2003-07-07,燃料种类:汽油,北京某机动车排放检测场 2015-07-29 检测,按 BASM 5024 工况检测,数据见表 2。

大量节省润滑油亦是对环保的重大贡献。我国的低浓度瓦斯发电技术处于国际领先地位。但其中一个重要问题是发动机油消耗较大,维修费用高,这在一定程度上阻碍了它的发展。使用纳米金刚石发动机油精使此问题得到重大突破。它使机油消耗率降低了 42%,并且减少了易损件的更换,大大延长了发电机组的工作时间。用 2 台新的 500GF-3RW 型燃气发电机做对比试验,具体数据见表 3。将 4 号机组按规定只加入昆仑牌 40 号机车四代机油,而 3 号机组又另加入 2%狗鱼牌纳米金刚石发动机油精作为对比机。不再对发动机进行任何调整,分别测量 3 号机和 4 号机的动力性、机油消耗、机油使用寿命。见表 3。

Table 1. Nano diamond engine oil essence can obviously improve engine's power, economy, cleanliness and sediment etc
表 1. 纳米金刚石发动机油精使发动机动力性经济性清净性和沉积物等明显改善

项目	内燃机功率 100 h/0 h	外特性燃油消耗率 100 h/0 h g/kW·h	负荷特性燃油消耗率 100 h/0 h g/kW·h	烟度 %	排气温度	出水温度 (100 点平均)
CH-4	+4.50%	-1.94%	-1.71%	86.0	286℃~317℃	87.20℃
CH-4 + 油精	+6.77%	-2.81%	-4.86%	68.8	274℃~303℃	74.87℃
相对变化	+2.27%	-0.87%	-3.15%	-20%	-12℃	-12.33℃
项目	沉积物 总和 g	缸套 粗糙度 Sa/nm	轴瓦 粗糙度 Sa/nm	进气门摇臂 粗糙度 Sa/nm	排气门摇臂 粗糙度 Sa/nm	清净性 评分
CH-4	0.2250	353.077	737.489	487.143	304.178	86.34
CH-4 + 油精	0.1581	346.195	529.863	364.391	296.883	88.03
相对变化	-0.0669 (-29.7%)	-6.882	-207.626	-122.752	-7.295	1.69
项目	活塞环一环磨损量 mm	活塞环二环磨损量 mm	缸套磨损量 (6 点平均) mm	缸套 表面硬度 HV0.1	缸套 侧面硬度 HV0.1	润滑油 铁含量 mg/kg
CH-4	0.005 高 0.007 厚	0.002 高 0.012 厚	0.0045	345	350	161
CH-4 + 油精	0.003 高 0.003 厚	0.000 高 0.009 厚	0.0033	377	376	116
相对变化	-0.002 高(-40%) 0.004 厚(-57%)	-0.002 高(-100%) 0.003 厚(-25%)	-0.0012 (-27%)	+32	+26	-45 (-28%)

Table 2. Test report of steady-state loading emission on gasoline vehicles in using
表 2. 在用汽油车稳态加载排放检测报告

检测项目	限值	测量值	测量值/限值
CO (%)	0.6	0.04	6.67%
HC (X 1/1000000)	90	13	14.4%
NO (X 1/1000000)	800	239	29.9%
发动机转速 r/min		975	

Table 3. Performance improvement and engine oil consumption reduction of type 500GF-3RW gas generator
表 3. 500GF-3RW 型燃气发电机的性能改善及机油消耗下降

机台编号	3	4	用油精的相对变化
运行时间	2007.10.26~2008.02.27	2007.10.26~2008.01.25	
连续运行天数	124 天继续正常运行	91 天必须大修	>>36%
平均输出功率/kW	403.57	386.47	+4.4%
机油消耗量/L	350	425	
平均机油消耗率/mL/kW·h	0.2914	0.5035	-42%
更换易损件	火花塞 3 支、横桥 2 件	火花塞 3 支、横桥 2 件、大摇臂 1 件	

3. 纳米金刚石润滑油性能优异

3.1. 油膜承载能力大幅提高

试验采用台湾产国光牌特级循环油 R68, 其油膜强韧, 不易破坏。可破坏油膜的最低能量——破膜能为 66.81 kJ。当分别加入 1%、2% 和 3% 的油精时, 其破膜能提高到 89.45、128.33 和 130.40 kJ [22]。在 Mobil Vacuoline 1409 型液压导轨油中加入纳米金刚石, 流阻系数可提高 12%~25%; 静压滑轨的面积系数可高出 10%~18%, 劲度系数可提高 20% 以上[23]。这大大提高了防爬行能力, 从而提高了机床加工精度。

3.2. 磨损量大幅降低

使用球—盘摩擦测试仪(pin-on-disk test rig), 负载 3 Kg, 滑动速度 30 rpm (0.036 m/s), 磨 100 min, 滑动距离 216 m。结果: AISI 1025 钢磨损量减少 70%, AISI 1045 钢磨损量减少 82% [24]。具体数据见表 4。

3.3. 摩擦功耗和油温明显降低

可使摩擦功耗由 76.05 W 降至 55.56 W, 相对减少 26.9% [22]。前述的 Z12V-190 柴油发电机组油温 75℃, 加入纳米金刚石油精后, 油温降至 72.5℃。

3.4. 摩擦系数和震动降低

实验装置: Falex^{#6} 多功能磨耗试验机, 上试件: 2.4 × 4.8 × 6.3 mm 长方体叶片, 未热处理, 硬度 334 ± 30 HV (~HRc29.8~36.6), 顺时针旋转。表面粗糙度 Ra = 0.499 ± 0.131 μm。下试件: φ57.1/φ38.2 圆环, 厚 16 mm, 热处理 HRc55, Ra = 0.044 ± 0.016 μm。名义接触面积: 2.4 mm × 6.3 mm × 3。

测试条件: 高负荷 5.11 MPa, 试件移动速度 7.30 m/s。摩擦系数随时间变化见图 1。可见加入油精 2% 和 3% 明显好于 0% 和 1%。不仅摩擦系数降低, 而且运转时震动噪声更底[22]。

Table 4. Wearing capacity of steel / steel friction pair is considerably reduced
表 4. 钢/钢摩擦副磨损量大幅降低

磨损量	1049 油	+5%油精	相对变化
AISI 1025 钢	0.0023 g	0.0007 g	-70%
AISI 1045 钢	0.0017 g	0.0003 g	-82%

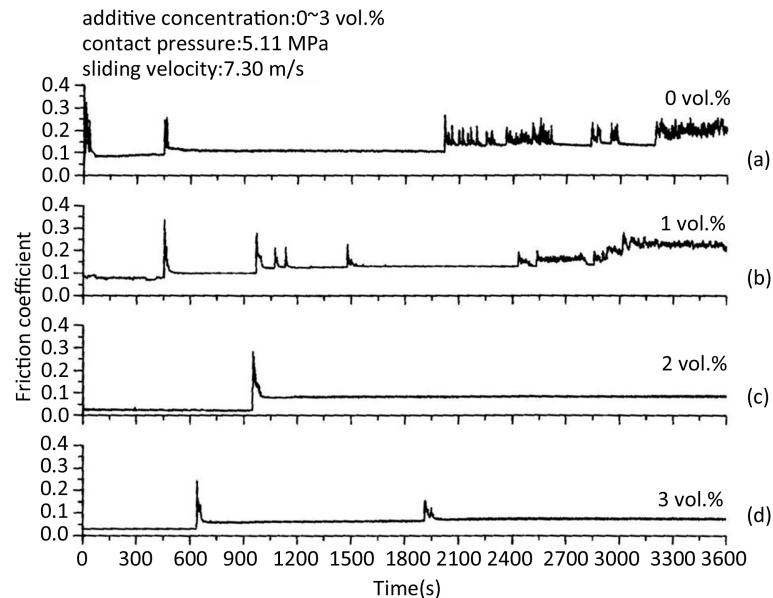


Figure 1. Oil essence effects on the friction coefficient
图 1. 油精对摩擦系数的影响

3.5. 传动机械效率提高

在输出转矩为 4.0~14.0 N·m (牛顿米) 的负载下(4 个测量点), 含纳米金刚石的润滑油可使微型蜗杆减速机的机械效率平均提高 2.25% [25]。

3.6. 密封性改善长时间使用性能更佳

Y-132M-4 型空压机用于喷漆。配用电机 7.5 KW。加入油精后启动电流、工作电流和充满罐所用时间均明显改善。见表 5。

3.7. 对摩擦副具有自修复功能

从机械基本知识看, 纳米金刚石润滑油对摩擦副确有自修复功能。金刚石的高硬度可将表面的微突抛光, 使摩擦副表面粗糙度大幅降低(图 2) [26], 从而使真实的接触面积增大很多, 摩擦系数降低很多。此外还可形成金属碳化物, 使摩擦副得到强化优化。

自修复功效实例: 1) 前几年有辆出租车行驶约 80 万公里未大修过, 烧机油严重, 平均约 2 L/1000km。经使用一段我们的纳米金刚石发动机油后, 机油消耗陡降至 0.03 L/1000km, 当然尾气黑烟也解决了。2) 一辆长安面包车使用纳米金刚石发动机油后最高时速由 105 km/h 提高到 120 km/h, 原缸压 0.7~0.8 MPa 升至 1.25 Mpa, 增幅达 56%, 油耗由 9.2 L/100km 降至 7.03 L/100km。3) 一辆夏利车每次加同样的油 19 L, 原可行驶 240 km, 加入纳米金刚石发动机油精后行驶距离逐步增加到 247、256、265 km, 直至 300 km 以上。

Table 5. Air compressor of type Y-132M-4 performance improvement
表 5. Y-132M-4 型空压机的性能改善

时间 2009年12月23日 开始试验	启动电流/A		充满罐所用时间 (压力 0.7~1)	备注 (两喷枪同时使用)
	压力为 1, 停机时的瞬间电流	压力为 0.7, 启动时的瞬间电流		
加入油精前	17.4	15.8	2 min 39 s	4 次平均
加入油精 15 min 后	17.3	15.4	1 min 5 s	3 次平均
加入油精 1 h 15 min 后	17.0	15.1	48s	1 次数值
加油精 1 h 15 min 后变化率	-2.3%	-4.4%	-69.8%	
加油精 135 d 后	15.8	14.3	58s	2~4 次平均
加油精 135 d 后变化率	-9.2%	-9.5%	-63.5%	



Figure 2. Nano-diamond lubricants can greatly reduce surface roughness of friction pairs; Abrasion test conditions: load = 150 N, sliding speed = 1.83 m/s, sliding distance = 6594 m; Comparison of surface morphology of steel/steel friction pair; (a) Spindle oil; (b) Spindle oil + 0.025% nD

图 2. 纳米金刚石润滑油使摩擦副表面粗糙度大幅降低; 磨损试验条件: 荷重 = 150 N, 滑动速度 = 1.83 m/s, 滑动距离 = 6594 m; 钢/钢摩擦副表面形貌对比; (a) 主轴油; (b) 主轴油 + 0.025% nD

自修复问题是个很复杂的问题, 摩擦副损伤的情况各异, 绝不可能用一种油就百分之百地解决。但纳米金刚石润滑油确实具有此功能, 并且相当多的情况下获得良好效果。

以上权威部门所测数据均是由我们提供的纳米金刚石润滑油或纳米金刚石润滑油精。纳米金刚石润滑油所以能够起到减磨抗磨减震降噪的特殊功效是由诸多因素引起的[27]。

4. 推广应用纳米金刚石润滑油无副作用

颠覆性创新产品初期远非是市场主流, 很自然人们会产生各种各样的疑问。

4.1. 摩擦副表面是否会划伤

目前机加工的表面粗糙度 Ra 值是微米级, 而我们的纳米金刚石呈超分散状态, 其粒径仅为 2~6 nm, 使用后不仅不会划伤而且能使表面粗糙度大幅降低(图 2), 这是目前精密机加工远远达不到的。

4.2. 气缸和活塞环的间隙是否会增大

发动机气缸和活塞环之间的间隙一般为 25~65 μm, 而该产品中的纳米金刚石的粒径仅是它的万分之一左右, 因此绝不会使间隙增大。

4.3. 摩擦副表面是否会出现超光滑

这里暂不讨论“微油池”理论是否科学。“超光滑”实际上是很难出现的。由于纳米金刚石润滑油使摩擦副之间有天文数字的微滚珠, 它们不仅把滑动摩擦变为滚动摩擦, 而且使 2 个金属表面之间直接接触的概率大为降低, 以超硬的纳米金刚石为骨架的油膜是很难破裂的[27]。

4.4. 纳米微粒是否能滚动

球轴承(微滚珠)效应确实是存在的。目测锃亮的钢滚珠, 其表面粗糙度 Ra 为 0.01~0.15 μm (GB 308-2002)。我们制作的呈超分散状态的纳米金刚石其粒径为 4.8~5.4 nm, 准球状。粗估后者的表面粗糙度仅是前者的 1/20 左右! 显然后者更易滚动, 金刚石的硬度肯定超过摩擦副而不会被压变形。纳米金刚石润滑油使滑动摩擦变成滚动摩擦, 故摩擦系数和磨损量大幅降低。

谢友柏院士等人完成的中国工程院咨询研究项目——“摩擦学科学及工程应用现状及发展战略研究”得出一个结论: “我国在纳米摩擦学方面已经取得了多项具有国际先进水平甚至领先的成果……一些小型民营企业在销售和推广它们的纳米节能抗磨产品” [28]。这反映了现实和专家的期望。

5. 结语

纳米金刚石润滑油的优异性能是经过权威部门测试、多方验证以及长期考验的。经特殊处理呈超分散状态的纳米金刚石其粒径为 4.8~5.4 nm, 准球状。它把滑动摩擦变成滚动摩擦, 使润滑油的油膜承载能力成倍提高, 减摩抗磨减振降噪作用明显, 这是用目前流行的有机化工的办法难以企达的。

如能推广这一利国利民的高科技产品, 将使节能减排的功效提高一大步。

参考文献 (References)

- [1] 侯祥麟. 中国炼油技术[M]. 北京: 中国石化出版社, 2001: 472.
- [2] Wang, X.L., Xu, B.S., Xu, Y., *et al.* (2006) Study on Friction and Wear Behavior and Mechanism of Nano-Cu Additive in Lubrication Oils. *Tribology*, **27**, 235-239.
- [3] Dong, G.J., Luo, Y.X. and Qu, J.J. (2004) Application of Nano Metal Powder on Lubricating Oil. *Lubrication Engineering*, **29**, 115-117.
- [4] 于鹤龙, 许一, 史佩京, 徐滨士, 王晓丽, 刘谦. 纳米铜颗粒的摩擦学性能研究及其减摩润滑机理探讨[J]. 材料工程, 2007(10): 35-38, 48.
- [5] Tarasov, S., Kolubaev, A., Belyabv, S., *et al.* (2002) Study of Friction Reduction by Nanocopper Additives to Motor Oil. *Wear*, **252**, 63-69. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00860-2](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00860-2)
- [6] Li, C.S., Yu, Y., Liu, Y.Q., *et al.* (2008) Synthesis and Tribological Properties of WS₂ Nanoparticles. *Chinese Journal of Inorganic Chemistry*, **24**, 275-279.
- [7] Li, C.S., Li, J.M. and Liu, Y.Q. (2007) The Progress of Transition Metal Nano-Sulphides Application in Tribology. *Lubrication Engineering*, **32**, 174-179.
- [8] Zhang, L., Li, J.S., Fu, X.S., *et al.* (2007) Application Study of Soluble Nano-TiO₂ Additive in GL-5 Automobile Gear Oil. *Lubrication Engineering*, **32**, 123-126.
- [9] Yang, H.M., Xiang, H., Liu, H.W., *et al.* (2007) Tribological Properties of LaPO₄ Nanoparticles on Surface of Aluminum Alloy. *Lubrication Engineering*, **32**, 74-76.
- [10] Ye, B. and Tao, D.H. (2008) Study on Tribological Characteristic of Chemically Modified CaTiO₃ Nano-Particles on Synthetic Esters. *Lubrication Engineering*, **33**, 30-31.
- [11] Cheng, X.Y., Deng, X.W., Cao, X.J., *et al.* (2001) Experimental Study on the Tribology Properties of Lanthanum Borate Nanoparticle as Additives in Lubricating Oil. *Mechanical Science & Technology*, **20**, 438-439.
- [12] Li, C.F., Luo, X.M., Chen, B.S., *et al.* (2007) Preparation and Tribological Performance of PS/SiO₂ Nano-Hybrid Composite as Rap Oil Additives. *Lubrication Engineering*, **32**, 74-76.
- [13] Wang, H., Yang, Q.L., Wang, Y.M., *et al.* (2008) Study on the Tribological Performance of the Ceramics Nanoparticle Additive in Lubricating Oil. *Lubrication Engineering*, **33**, 48-50.

- [14] Gu, Z.M., Gu, C.-X. and Shwe. S.T. (2007) Study on Tribological Properties of Lubricating Oils with Mixtures Additives of Nano-CeO₂ and Nano-Cu. *Transactions of Materials & Heat Treatment*, **28**, 292-295.
- [15] Cao, H., Xue, J., Chen, J.Z., et al. (2007) Effect of Nano Copper/Graphite as a Composite Additive on the Tribological Properties of Lubricating Oil. *Materials Protection*, **40**, 11-13.
- [16] Zhang, Z., Gu, L., Qi, Y., et al. (2000) Research on the Improving Friction Properties of Lubricating Oil with Nano Metal Powder. *Lubrication Engineering*, No. 2, 37-40.
- [17] Mabuchi, Y. and Nakagawa, A. (2006) Nanoparticle-Containing Lubricating Oil Composition Used in Internal Combustion Engine, Contains Additive Having Hydroxyl Group, Base Oil and Nano Particle. WO2007088649-A1.
- [18] Polyakov, L.A., Nikitin, E.V., Vasitenko, V.I., et al. (2004) Antifriction Additive. RU2225879-C1.
- [19] Zhang, J., Liu, K. and Hu, X. (2002) Effect of Ultra-Dispersed Diamond Nano Particles as Additive on the Tribological Properties of 15W/30 Engine Oil. *Tribology*, **22**, 44-48.
- [20] Zakharov, A.A., Kuchma, E.I. and Staver, A.M. (1996) Industrial Oil for Lubricating Reducers and Various Types of Transmission Devices-Contains Ultra-Disperse Graphite-Diamond Powder and Specified Fraction of Synthetic Fatty Acids or Tall Oil Acids. RU2042711-C1.
- [21] 张书达, 刘美华, 季德钢. 超分散金刚石在润滑油中的奇特功效[C]//李志宏. 第四届郑州国际超硬材料及制品研讨会论文集. 北京: 机械工业出版社, 2003: 181.
- [22] 许文正. 油润滑擦损磨耗微结构之观察与模型之建立[D]: [硕士学位论文]. 台南: 成功大学, 2008.
- [23] 张书达. 改性纳米金刚石液压导轨油[J]. 世界制造技术与装备市场, 2006(5): 84-87.
- [24] Chou, C.-C. and Lee, S.-H. (2010) Tribological Behavior of Nanodiamond-Dispersed Lubricants on Carbon Steels and Aluminum Alloy. *Wear*, **269**, 757-762.
- [25] 刘美华. 对分散在蜗杆油中的纳米粒子摩擦学性能的试验研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2002.
- [26] 康渊. 主轴油及导轨油使用奈米粉体调质之技术开发及润滑特性探讨[C]//行政院国家科学委员会. 专题研究计划成果报告. NSC94-2212-E-033-012-.
- [27] 张书达. 改性纳米金刚石润滑油减摩抗磨机理[J]. 金刚石与磨料磨具工程增刊, 2006: 100-103.
- [28] 谢友柏. 摩擦学科学及工程应用现状与发展战略研究[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009: 23.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2160-7613, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: ms@hanspub.org