

# 几种纳米剂在润滑油中的摩擦学性能对比

杨俊儒<sup>1</sup>,尹兴林<sup>2</sup>,王 稳<sup>3</sup>,王 婷<sup>1</sup>

(1. 长安大学 汽车学院,陕西 西安 710064; 2. 陕西天德节能技术有限责任公司,  
陕西 西安 710021; 3. 西京学院 汽车学院,陕西 西安 710123)

**摘 要:**为了考察纳米剂在润滑油中的摩擦学性能,应用四球摩擦磨损试验机研究了烃分子纳米剂、氟碳纳米剂和金刚石纳米剂作为润滑油极压抗磨剂的摩擦学性能;并用扫描电子显微镜分析了磨痕表面的形貌。结果表明:烃分子纳米剂具有更好的抗磨损性能,氟碳纳米剂具有更好的抗极压性能;不同的纳米剂在润滑油中的极压抗磨性能差异较大。

**关键词:**汽车工程;纳米剂;润滑油;摩擦学性能

**中图分类号:**U473.6 **文献标志码:**A

## Comparative research on nano-additives' tribological performance in lubricating oil

YANG Jun-ru<sup>1</sup>, YIN Xing-lin<sup>2</sup>, WANG Wen<sup>3</sup>, WANG Ting<sup>1</sup>

(1. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;  
2. Shaanxi Tiande Power-saving Technology Co Ltd, Xi'an 710021, Shaanxi, China;  
3. School of Automobile Engineering, Xijing University, Xi'an 710123, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to research nano-additives' tribological performance in lubricating oil, the tribological performance of nano-hydrocarbon, nano-fluorine carbon and nano-diamond as additives of lubricating oil were studied by applying four-ball tester. The scanning electron microscope was used to analyze the morphology of wear surface. The result shows that nano-hydrocarbon contains more excellent antiwear characteristics, nano-fluorine has more excellent anti-extreme pressure capacity. Different nano-additives' extreme pressure and wear resistance capacity in lubricating oil has significant difference. 1 tab, 6 figs, 10 refs.

**Key words:** automobile engineering; nano-additive; lubricating oil; tribological performance

## 0 引 言

纳米粒子具有表面效应、量子尺寸效应、体积效应和宏观量子隧道效应等特殊的物理和化学性质,因而在诸多领域得到了广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。在摩擦学领域,近年来开展了大量的研究,多种纳米粒子作为润滑油极压抗磨添加剂,均能提高润滑油的极压抗

磨性能<sup>[3-10]</sup>。这些纳米剂分为:无机纳米剂、有机纳米剂、金属纳米剂和非金属纳米剂等。

本文选择了目前广泛应用的 3 种商品纳米剂,即烃分子纳米剂、氟碳纳米剂和金刚石纳米剂,分别作为润滑油极压抗磨添加剂,研究了其摩擦学性能;利用高倍扫描电子显微镜(SEM)观察了磨痕表面的形貌;并对烃分子纳米剂、氟碳纳米剂和金刚石纳

米剂的摩擦磨损机理进行了探讨。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

纳米剂类别:烃分子纳米剂、氟碳纳米剂和金刚石纳米剂;

润滑油:15W-40 SF 级汽油机油;

钢球:GCr15 标准钢球,直径为 12.7 mm,硬度为 61~65 HRC。

1.2 试验方法

利用 MS-800 四球摩擦磨损试验机,根据《润滑剂承载能力测定法(四球法)》,分别研究了 3 种商品纳米剂在不同添加量时的摩擦学性能,测量了最大无卡咬负荷( $P_B$ )和磨痕直径。磨痕直径试验条件为:转速 1 450 r/min,时间 30 min,载荷 392 N,室温 23 ℃。磨痕直径为油盒中 3 个钢球磨痕直径的平均值。

利用 JSM-5800 扫描电子显微镜对磨痕表面进行了观察,探讨了添加不同纳米剂的润滑油的摩擦磨损机理。

1.3 试验设计

试样编成 7 个组,依据 3 种商品纳米剂的生产厂家提供的最佳添加量范围,每组试样分别在润滑油中添加不同种类以及不同质量分数(随组号数字的增大,添加量也增大)的纳米剂。3 种纳米剂分别在润滑油中的添加量(质量分数)与编组的对应关系见表 1。

表 1 3 种纳米剂分别在润滑油中的添加量与试样编组的关系

纳米剂	试样 1 组	试样 2 组	试样 3 组	试样 4 组	试样 5 组	试样 6 组	试样 7 组
氟碳纳米剂 (质量分数)/%	0	0.10	0.25	0.40	0.55	0.70	0.80
金刚石纳米剂 (质量分数)/%	0	0.04	0.08	0.12	0.16	0.20	0.24
烃分子纳米剂 (质量分数)/%	0	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00

根据表 1 的试验安排,配制出 7 组共 21 个试样,在恒温 80 ℃下,充分搅拌 30 min,静置 24 h 后进行试验。

2 试验结果与分析

2.1 纳米添加剂的摩擦学性能

利用四球摩擦磨损试验机,通过测定磨痕直径和最大无卡咬负荷( $P_B$ )考察其摩擦性能。3 种纳米

剂分别在润滑油中不同添加量时的磨痕直径如图 1 所示; $P_B$  值如图 2 所示。

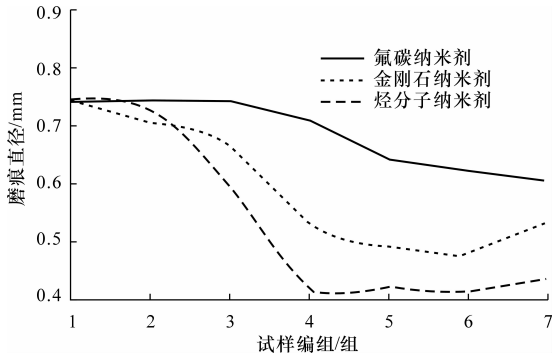


图 1 3 种纳米剂分别在润滑油中不同添加量时的磨痕直径

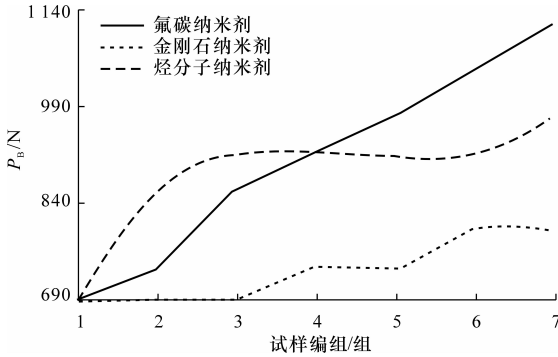


图 2 3 种纳米剂分别在润滑油中不同添加量时的  $P_B$  值

从图 1、图 2 可以看出,随着氟碳纳米剂、金刚石纳米剂和烃分子纳米剂添加量的增大,润滑油的磨痕直径均有降低, $P_B$  值均有提高,即润滑油的极压抗磨性能提高,但 3 种纳米剂对增强润滑油的极压抗磨性能的差异较大。

随着烃分子纳米剂添加量的增大,磨痕直径降低显著,在 3 种纳米剂中降低幅度最大; $P_B$  值先增大后趋于稳定,但随添加量的再增大,又有所增大;总体看来,烃分子纳米剂的抗磨性能较好,但其油膜的极压性能较差。这是由于,烃分子纳米剂是由矿物油通过断链等手段制备而成的单分子物质,这些单分子物质尺寸小,具有较强的极性,可直接吸附到摩擦表面的凹坑和缝隙中,形成一层纳米保护膜,从而降低了摩擦,减少了磨损。

随着金刚石纳米剂添加量的增大,磨痕直径先减小后增大; $P_B$  值逐渐增大,在 3 种纳米剂中增加幅度最小;总体看来,金刚石纳米剂的极压抗磨性能不好。这是由于,纳米剂的金刚石呈球形微粒,在润滑油中形成滚珠轴承悬浮结构,在摩擦副表面形成滚珠轴承结构膜,将原来的滑动摩擦变为滚动摩擦,从而降低了摩擦磨损;当添加量再增大时,磨痕直径增大,可能是由于金刚石纳米剂添加量增大后,增加

了纳米团聚,从而增加了磨粒磨损。

随着氟碳纳米剂添加量的增大,磨痕直径逐渐减小,在3种纳米剂中其减小幅度最小; $P_B$ 值一直增大,在3种纳米剂中其增加幅度最大;总体看来,氟碳纳米剂的抗磨性能较差,但其油膜的极压性能较好。这是由于,氟碳纳米剂本身不是润滑油添加剂,是微溶于润滑油的纯氟碳物质;润滑油只是氟碳纳米剂的一种载体,通过机械摩擦将氟碳分子传递到摩擦表面,然后与润滑油彻底分离,通过改变润滑油膜性质,形成氟碳保护涂层,改变了摩擦表面的摩擦性能,从而降低了摩擦磨损。

## 2.2 磨痕表面形貌分析

为了分析纳米剂的抗摩减磨机理,对表1中第5组试样长磨后的钢球,通过扫描电子显微镜拍片分析。扫描电子显微镜所拍照片(600倍),润滑油的摩擦表面形貌如图3所示;润滑油中添加金刚石纳米剂的摩擦表面形貌如图4所示;润滑油中添加氟碳纳米剂的摩擦表面形貌如图5所示;润滑油中添加烃分子纳米剂的摩擦表面形貌如图6所示。

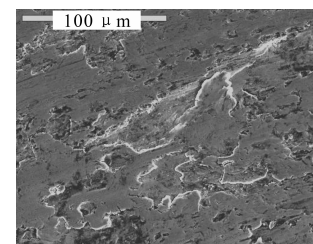


图3 润滑油的摩擦表面形貌

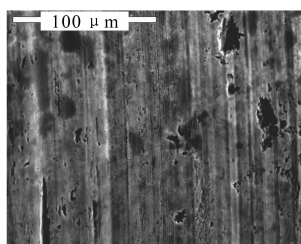


图4 润滑油中添加金刚石纳米剂的摩擦表面形貌

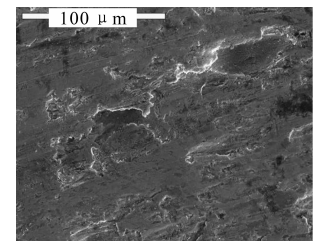


图5 润滑油中添加氟碳纳米剂的摩擦表面形貌

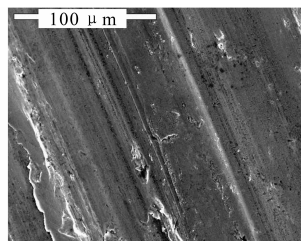


图6 润滑油中添加烃分子纳米剂的摩擦表面形貌

由图3~图6可看出:润滑油中添加氟碳纳米剂和未添加任何纳米剂时润滑油的钢球表面出现了粘着和微裂纹迹象。这是由于,摩擦点的温度随着摩擦时间而升高,油膜强度降低,实际接触点处于边界润滑状态,出现了粘着磨损,从而产生裂纹;添加金刚石纳米剂的润滑油的钢球表面有粘着、微裂纹和犁沟迹象,从磨痕的形貌来分析,这是由磨粒磨损造成的;添加烃分子纳米剂的润滑油,钢球表面有沟槽,其沟槽表面光滑,这是由于摩擦表面擦伤而引

起的。

从上面的磨痕直径、 $P_B$ 值和磨痕表面形貌分析可以得出,添加纳米剂的润滑油,其极压抗磨性能明显优于未添加纳米剂的润滑油;不同纳米剂因其降低摩擦、减少磨损的机理不同,其效果差异较大。通过对比试验表明,添加烃分子纳米剂的润滑油具有更好的抗磨损能力;添加氟碳纳米剂的润滑油具有更好的极压性能。

## 3 结 语

(1)添加烃分子纳米剂的润滑油抗磨性能最优;添加氟碳纳米剂的润滑油极压性能最优;添加纳米金刚石的润滑油极压抗磨性能相对较差。

(2)3种纳米剂均能提高润滑油的极压抗磨性能,但其添加量对润滑油的极压抗磨性能影响较大,需严格控制其添加量。

(3)纳米剂在摩擦表面通过“填充、修复、滚珠”等方式,可以对摩擦表面起到降低摩擦、减少磨损的作用。

## 参考文献:

### References:

- [1] 乔玉林,徐滨士. 纳米微粒的润滑和自修复技术[M]. 北京:国防工业出版社,2005.
- [2] 马剑奇,王晓波,崔若梅. 油溶性Cu纳米微粒添加剂对几种商品润滑油摩擦性能的影响[J]. 润滑与密封,2004,29(3):52-53.  
MA Jian-qi, WANG Xiao-bo, CUI Ruo-mei. Effect of oil-soluble Cu nanoparticles as additive on the friction-reducing and antiwear ability of several kinds of commercial lubricating oil[J]. Lubrication Engineering, 2004,29(3):52-53.
- [3] 冯雪君,杨志伊. 添加纳米磁性微粒的润滑油摩擦学行为研究[J]. 润滑与密封,2007,32(3):122-124.  
FENG Xue-jun, YANG Zhi-yi. Tribological properties of MnZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nano magnetic particles as an additive in base oil[J]. Lubrication Engineering, 2007,32(3):122-124.
- [4] 王晓丽,徐滨士,许一. 纳米铜润滑油添加剂的摩擦磨损特性及其机理研究[J]. 摩擦学报,2007,27(3):235-239.  
WANG Xiao-li, XU Bin-shi, XU Yi. Study on friction and wear behavior and mechanism of nano-Cu additive in lubrication oils[J]. Tribology, 2007,27(3):235-239.

(下转第106页)

## 参考文献:

## References:

- [1] 甘礼华,陈龙武,张宇星.非超临界干燥法制备  $\text{SiO}_2$  气凝胶[J].物理化学学报,2003,19(6):504-508.  
GAN Li-hua, CHEN Long-wu, ZHANG Yu-xing. Preparation of silica aerogels by non-supercritical drying[J]. Acta Physica-Chimica Sinica, 2003, 19(6): 504-508.
- [2] 刘威,钟伟,都有为.核/壳结构复合纳米材料研究进展[J].材料导报,2007,21(3):59-61.  
LIU Wei, ZHONG Wei, DU You-wei. Research progress in nanocomposites with core/shell structures [J]. Materials Review, 2007, 21(3): 59-61.
- [3] 刘文芳,郭朝霞,于建. PS/ $\text{SiO}_2$  复合型纳米粒子的制备研究[J].化工进展,2004,23(9):993-997.  
LIU Wen-fang, GUO Zhao-xia, YU Jian. Study on preparation of PS/ $\text{SiO}_2$  nanocomposite particles[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2004, 23(9):993-997.
- [4] 熊玉钦.聚丙烯酸酯/硅溶胶复合乳液的制备及在水性涂料中的应用[D].北京:北京化工大学,2006.
- [5] Luna-Xaver J L, Bourgeat-Lami E, Guyot A. The role of initiation in the synthesis of silica/poly(methyl methacrylate) nanoacomposite latex partieles through emulsion polymerization[J]. Colloid Polymer Science,
- (上接第 97 页)
- [5] 李久盛,张立,王会东.润滑油纳米添加剂研究现状及趋势[J].润滑油,2008,23(1):5-9.  
LI Jiu-sheng, ZHANG Li, WANG Hui-dong. Research status and development trend of nanoparticles as lubricating oil additives [J]. Lubricating Oil, 2008, 23(1):5-9.
- [6] 王平,郑少华,苏登成.几种无机纳米粒子在润滑油中抗磨性对比研究[J].润滑与密封,2006,31(9):157-160.  
WANG Ping, ZHENG Shao-hua, SU Deng-cheng. Comparison research of antiwear property for several inorganic nano-particles in lubricating oil[J]. Lubrication Engineering, 2006, 31(9):157-160.
- [7] 顾卓明,顾彩香.纳米  $\text{CaCO}_3$ 、Cu 混合物润滑油添加剂的摩擦学性能[J].润滑与密封,2006,31(7):95-96.  
GU Zhuo-ming, GU Cai-xiang. Tribological perform-

2001,279(10):947-958.

- [6] Luna-Xavier J L, Guyot A, Bourgeat-Lami E. Synthesis and characterization of silica/poly (methyl methacrylate) nano composite latex particles through emulsion polymerization using a cationicazo initiator [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2002, 250(1):82-92.
- [7] 曹同玉,戴兵,戴俊燕,等.单分散、大粒径聚苯乙烯微球的制备[J].高分子学报,1997(2):158-165.  
CAO Tong-yu, DAI Bing, DAI Jun-yan, et al. Preparation of monodisperse polystyrene microspheres with large size [J]. Acta Polymerica Sinica, 1997(2): 158-165.
- [8] Shinji H, Kazuhiro F, Norio T. Grafting of hyperbranched polymers onto ultrafine silica; postgraft polymerization of vinyl monomers initiated by pendant initiating groups of polymer chains grafted onto the surface[J]. Reactive Functional Polymers, 2000, 46(2): 193-201.
- [9] 李永超,张毅,金日光.分散聚合法制备二氧化硅/聚苯乙烯单分散复合微球[J].复合材料学报,2005,22(2):21-26.  
LI Yong-chao, ZHANG Yi, JIN Ri-guang. Silicon dioxide/polystyrene monodisperse polystyrene composite microsphere by dispersion polymerization[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2005, 22(2):21-26.
- ance of lubricating oils additives of mixtures of nano- $\text{CaCO}_3$  and nano-Cu [J]. Lubrication Engineering, 2006, 31(7):95-96.
- [8] 董国军,罗云霞,曲建俊.纳米金属粉在润滑油中的应用[J].润滑与密封,2004,29(6):115-117.  
DONG Guo-jun, LUO Yun-xia, QU Jian-jun. Application of nano metal powder on lubricating oil[J]. Lubrication Engineering, 2004, 29(6):115-117.
- [9] 岳美娥,周慧娣.纳米微粒在摩擦学中的应用研究[J].润滑与密封,2003,28(7):85-87.  
YUE Mei-e, ZHOU Hui-di. Application of nanoparticles in tribology[J]. Lubrication Engineering, 2003, 28(7):85-87.
- [10] 刘维民.纳米颗粒及其润滑油脂中的应用[J].摩擦学报,2003,23(4):265-267.  
LIU Wei-min. Application of nanoparticles in lubricants[J]. Tribology, 2003, 23(4):265-267.