

纳米添加剂对 GCr15/1045 钢摩擦磨损性能的影响^{*}

李 征, 王文健, 刘启跃

(西南交通大学 摩擦学研究所, 成都 610031)

摘 要: 随着纳米科技的发展和对纳米材料功能特殊性的认识, 纳米材料作为添加剂开始越来越多的应用到机械的润滑和抗磨自修复研究中。文中利用 PLINT NENE-7 型磨损试验机, 以中石油兰州润滑油厂生产的中负荷工业闭式齿轮油 L-CKC220 作为基础油研究了纳米氮化铝、纳米碳化硅和油溶性纳米铜合金作为添加剂对 GCr15/1045 钢摩擦副滑动摩擦磨损特性的影响。分析不同纳米材料对摩擦因数曲线、磨斑形貌 (SEM) 及 EDX 能谱分析图的影响。结果表明: 3 种纳米添加剂均能使摩擦副的摩擦因数明显降低; 纳米氮化铝和油溶性纳米铜合金作为添加剂具有良好的减摩和抗磨性能, 分别使摩擦系数降低 33.3% 和 28.6%, 并能非常明显的沉积在摩擦副表面; 纳米碳化硅的性能较差。

关键词: 纳米添加剂; 减摩; 抗磨; 磨损

中图分类号: TH17.1

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2011)06-0068-05

Effect of Nano-additive on Friction and Wear Performance of GCr15/1045 Steels

LI Zheng, WANG Wen-jian, LIU Qi-yue

(Tribology Research Institute, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

Abstract: With the development of nanotechnology and the increasing knowledge of the particularity of nano-composite materials, more and more nanomaterials, which are used as additives, are applied to study the lubrication, anti-wear and self-healing of machines. The sliding friction and wear performance of nano-aluminum nitride, oil-soluble nano-copper alloy and nano-silicon carbide were studied, which were used as additives in the base oil. The medium duty industrial gear oil L-CKC220 from the Lanzhou Lubricating Oil Plant of PetroChina was chose as the base oil. The experiment was tested on the PLINT Deltalab-NENE-7 horizontal electro-hydraulic servo budge abrasion tester with GCr15/1045 steel pair. The effects of different nanomaterials were analyzed. By analyzing friction coefficient curves, worn morphology and EDX, the results show that all of the three nano-additives can reduce friction coefficient obviously, however, nano-aluminum nitride and oil soluble nano-copper alloy give a better performance as additives in friction and anti-wear, reducing the friction coefficient 33.3% and 28.6% respectively, and these two materials deposite on the surface of friction pairs obviously. But the properties of nano-silicon carbide are worse than them.

Key words: nano-additive; reduce friction; anti-wear; wear

0 引 言

机器在工作运行时, 各零件相对运动的接触部分都存在着摩擦磨损, 于是摩擦磨损成为了机器运转过程中不可避免的物理现象。磨损不仅会损耗材料, 而且会使机械运转消耗更大的能量, 甚至导致机械零件的失效。据统计, 我国每年因机械磨损所损耗的材料高达几亿元, 世界上一次性能源的 1/3 以上是因摩擦而损失的^[1-2]。

虽然近年来很多专家和学者在减摩和抗磨

方面做了很多的研究, 但是如今机械设备的磨损情况依然很严重。近几年, 新兴的金属磨损自修复技术在一定程度上指明了减摩、抗磨研究的发展方向。但是目前对金属磨损自修复技术的研究还处于理论摸索阶段, 没有形成统一的成型理论, 大部分的假说基础都来自于试验。现有的很多具有明显自修复效果的自修复材料也是通过试验得出的。当前有大量的专家和学者研究了铜、锌、镁等纳米态金属和硅酸盐等复合物对摩擦磨损的自修复试验影响, 并取得了较好的研究进展^[3-7]。

金属磨损自修复技术对机械工程、经济发展和生产安全都有非常重大的意义。文中主要通

收稿日期: 2011-06-23; **修回日期:** 2011-11-03

基金项目: * 四川省公益性研究计划资助项目 (2008GG0002)

作者简介: 李 征 (1988—), 男 (汉), 山东临沂人, 硕士。

过在 PLINT NENE-7 磨损试验机进行摩擦磨损试验,对比研究了三种纳米添加剂的减摩、抗磨和磨损自修复性能。

1 试验部分

磨损试验在 PLINT NENE-7 卧式电液伺服微动磨损试验机进行^[8],试验装置如图 1 所示。摩擦副为 GCr15 钢球体与 1045 钢平面试样上下接触,在垂直方向施加载荷 F_n ,球体通过在液压动力下的活塞来实现水平方向的滑动,并产生位移 D 。摩擦副的接触部分完全浸泡在润滑介质中,以保证润滑条件^[9]。

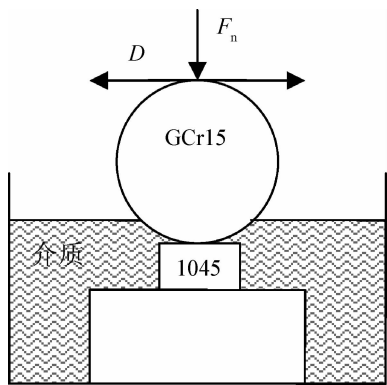


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 The schematic diagram of the test machine

磨损试验参数:位移幅值 $D = \pm 100 \mu\text{m}$;法向载荷 $F_n = 90 \text{ N}$;频率为 $f = 2 \text{ Hz}$;循环次数 $N = 10^4$ 。

试验选用的基础油为中石油兰州润滑油厂生产的中负荷工业闭式齿轮油 L-CKC220。试验选用 3 种纳米态的添加剂材料,包括上海水田材料科技有限公司生产的粉末态纳米氮化铝和纳米碳化硅,河南王屋纳米科技有限责任公司生产的液态 DNCu-1 型油溶性纳米铜合金。纳米氮化铝和纳米碳化硅作为添加剂按照 5% 的溶液质量-体积分数进行配制,油溶性纳米铜合金按照 5% 的溶液体积分数进行配制。由于纳米微粒相互摩擦、冲击而吸收大量的机械能和热能,并在微粒表面产生一定量的电荷,结合微粒较大的比表面能,使得微粒处在极不稳定的状态;并且当材料超细化到一定程度时,微粒之间的吸引力远大于重力作用,再加上静电作用、化学键作用和毛细作用,使得微粒之间的相互吸引能力变大,从而容易产生团聚现象^[10-11]。因此先利用聚

乙二醇(PEG200)作为分散剂进行分散,然后通过机械搅拌将溶液搅拌均匀,最后用超声波仪分散 30 min。

2 结果与分析

通过图 2 的摩擦因数曲线可以看出,在加入纳米添加剂后,摩擦磨损试验的跑合阶段得到相应的变化。跑合效果最好的是油溶性纳米铜合金,其次是纳米氮化铝,最差的是纳米碳化硅。相比基础油,油溶性纳米铜合金摩擦因数的跑合峰值略有下降,但是跑合加快,时间缩短一半;纳米氮化铝的摩擦因数峰值有大幅度下降,但是跑合时间略有增加;纳米碳化硅的跑合时间和峰值都有明显的增加。

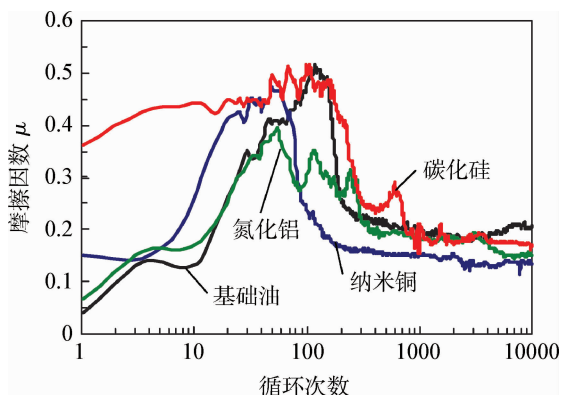


图 2 基础油和 3 种纳米添加剂对摩擦因数的影响

Fig. 2 The effect of base oil and three nano-additives on the friction coefficient

从图中可以看出加入纳米添加剂以后,摩擦因数均有一定的降低。4 条摩擦因数曲线在 4 000 次循环以后明显的被区分出来,并且在之后的稳定阶段非常平稳,波动都非常小。在这个阶段可以明显的分辨出纳米添加剂的减摩效果,减摩效果最好的是油溶性纳米铜合金,其次是纳米氮化铝,最差的是碳化硅。在稳定阶段,相比基础油,油溶性纳米铜合金的摩擦因数有了大幅度的降低,从基础油的 0.21 减少到 0.14,大约减少 33.3%;纳米氮化铝的摩擦因数也有较大幅度的降低,从基础油的 0.21 减少到 0.15 左右,减少 28.6%;相对前两种纳米添加剂,纳米碳化硅的减摩效果略差,稳定阶段摩擦因数最终稳定在 0.18 左右,相对基础油减少 14.3%。

通过分析摩擦因数曲线的跑合阶段(上升坡度、最大幅值、下降坡度和整体的跑合时间)和稳

定阶段(平稳度、均值和走向)可以得出油溶性纳米铜合金的减摩效果最好,纳米氮化铝次之,纳米碳化硅最差。

不同添加剂工况下平面试样磨斑 SEM 形貌如图 3 所示,对磨斑中心进行轮廓扫描,得出各种添加剂下的磨斑轮廓曲线如图 4 所示。

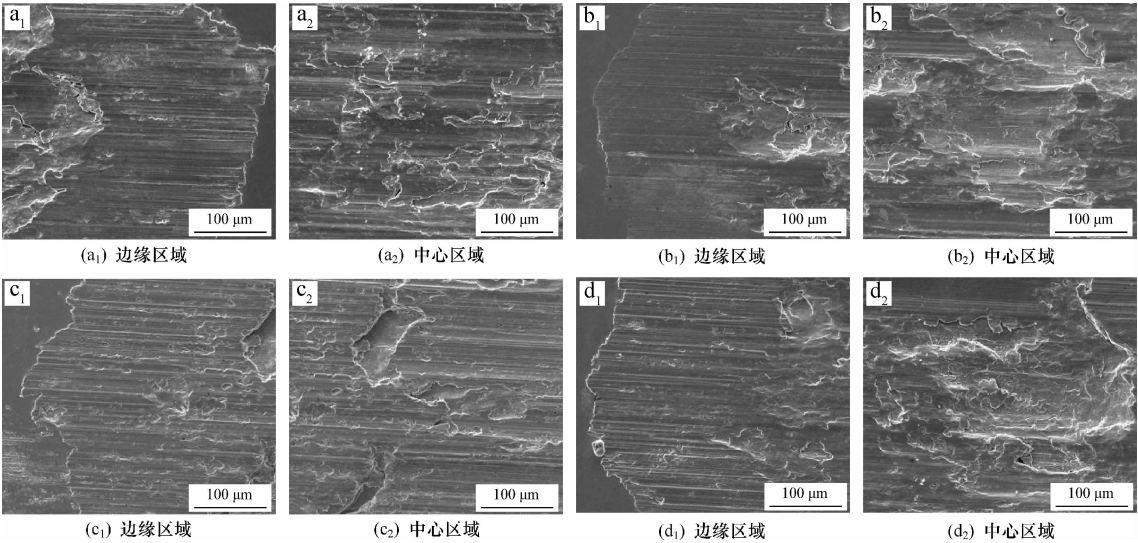


图 3 基础油(a₁, a₂)、纳米铜合金(b₁, b₂)、纳米氮化铝(c₁, c₂)以及纳米碳化硅(d₁, d₂)工况下平面试样磨痕 SEM 形貌
Fig. 3 SEM of wear scar under base oil condition(a₁, a₂), nano-copper alloy condition(b₁, b₂), nano-aluminum nitride condition (c₁, c₂) and nano-silicon carbide condition (d₁, d₂)

对比分析磨斑边缘电镜照片可以看出基础油下的磨斑边缘区域有较严重的犁削沟槽出现;油溶性纳米铜合金下的磨斑边缘犁削比较轻微,在某些区域甚至没有明显的划痕出现;纳米氮化铝下的磨斑边缘较为严重,并且伴随出现了一些小的点蚀,并且在磨斑之外的地方也出现了一些小的点蚀;纳米碳化硅下磨斑的边缘区域的磨损也较为严重,并伴有一些剥落。

对比分析磨斑中心区域可以看出,基础油下的磨斑中心粘着区域有大量的块状剥落出现,在某些区域甚至出现了较小的裂纹;在纳米铜合金下磨斑的中心区域有较多的剥落,但是相对较为轻微,并且磨坑相对较为平坦;纳米氮化铝分散系下磨斑的中心区域分成了 3 个较大的磨坑,磨坑中的磨损主要以犁削生成的沟槽为主,极少地方出现块状剥落,这说明沉积的氮化铝在一定程度上起到了滚珠的作用,变滑动摩擦为滚动摩擦,减缓了中心区域的磨损,而在载荷作用下,较少的微凸体依然犁削接触表面,生成了沟槽;在纳米碳化硅分散系下磨斑的中心区域,出现了大量的块状剥落,并且磨坑非常深,分散不规则,在某些地方也出现了较小的裂纹。由此可见,油溶

性纳米铜合金和纳米氮化铝的抗磨效果都很好,纳米碳化硅较差。

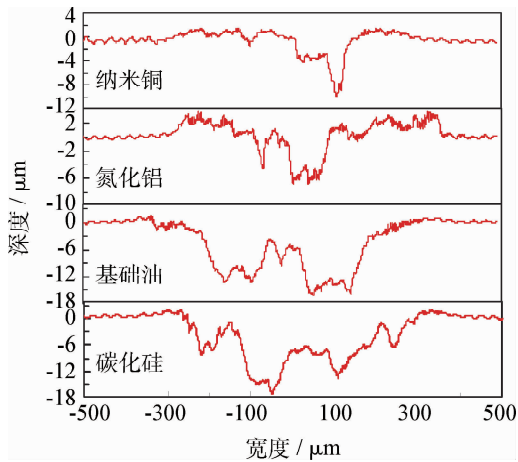


图 4 不同添加剂下试样磨痕中心轮廓图
Fig. 4 The wear profile of wear scar of the specimens under different additives conditions

对比分析磨斑轮廓曲线可以看出,基础油下的磨斑最大,并且磨损非常严重,最深磨损超过 15 μm;油溶性纳米铜合金的磨斑是最小的,并且中心的粘着磨损较为集中,磨损相对较为轻微,

最深磨损不超过 10 μm ;纳米氮化铝的磨斑虽然较宽,但是磨斑较浅,在某些地方甚至出现了负磨损,磨斑轮廓高出了原有的材料表面,而且最深磨损不超过 10 μm ;纳米碳化硅的磨斑较大,并且中心粘着区域的磨损较深,最深磨损超过了 18 μm ,并且磨斑轮廓曲线与基础油的磨斑轮廓曲线相似。

将试块分别在丙酮和酒精中经过超声波清洗之后,对四种分散系下的磨斑中心进行 EDX 能谱分析,得出图 5 所示的磨斑中心的能谱分析图,在一定程度上可以表征磨斑中心各种元素,定性的分析纳米材料中元素的含量。图 5(a)是基础油系下磨斑中心的 EDX 能谱分析图。图 5(b)是纳米铜合金分散系下的磨斑中心 EDX 能谱图,图中出现了 Cu 元素的峰值,这说明在油溶性纳米铜合金下的磨斑中心存在 Cu 元素,而在

基础油系下的 EDX 能谱分析图中并没有出现 Cu 元素的峰值,这些 Cu 元素是纳米铜合金添加剂中的 Cu 在摩擦过程中附着到磨斑表面生成的。图 5(c)是纳米氮化铝分散系下的磨斑中心 EDX 能谱图,从图中可以看出,相比基础油下的磨斑多出了 Al 元素的峰值,并且峰值高度远大于纳米铜合金下磨斑的 Cu 元素,在摩擦过程中沉积附着到磨斑表面,生成自修膜。在纳米碳化硅分散系中的 EDX 能谱分析图 5(d)中没有发现较明显的 Si 元素,因此纳米碳化硅对摩擦磨损表面的附着能力有待进一步研究。通过以上对 EDX 能谱图的分析,可以定性得出三种纳米添加剂材料在摩擦磨损过程中对摩擦磨损表面都有一定的附着能力:纳米氮化铝的效果最好,油溶性纳米铜合金次之,纳米碳化硅的效果不明显。

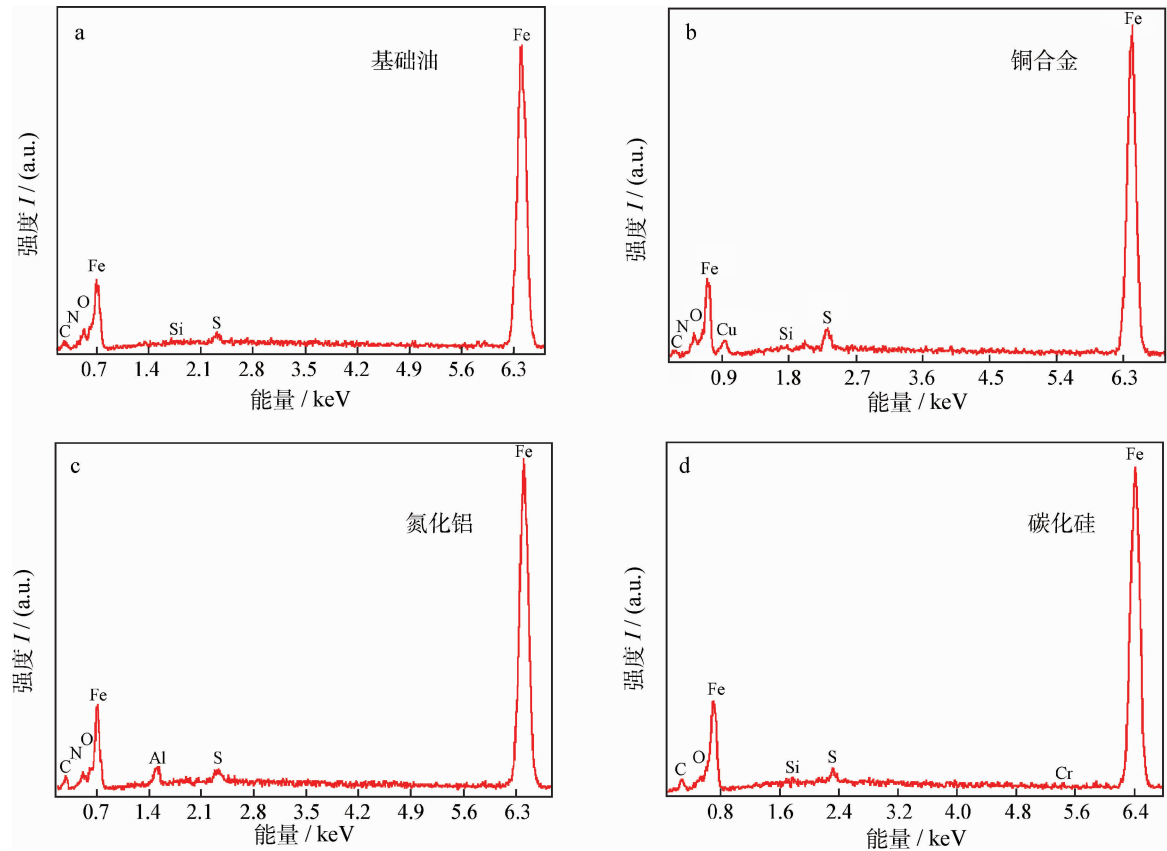


图 5 不同添加剂下试样磨斑中心 EDX 能谱图
Fig. 5 EDX spectrum of the wear scar central zone under different additives conditions

3 结 论

(1) 3 种纳米添加剂均具有一定的减摩效果,其中油溶性纳米铜合金的减摩耐磨性能最

好,纳米氮化铝次之,纳米碳化硅最差。
(2) 通过对比不同添加剂下试样磨斑 SEM 形貌、磨斑中心轮廓图和磨斑中心 EDX 能谱图,可以定性的得出这 3 种纳米材料对摩擦磨损表

面都具有一定的附着能力,其中纳米氮化铝的效果最好,油溶性纳米铜合金次之,纳米碳化硅最差。在纳米氮化铝和油溶性纳米铜合金具有较好的附着能力的基础上,可以进一步研究这两种纳米材料的金属磨损自修复能力。

参考文献

[1] 刘维民,薛群基,周静芳,等. 纳米颗粒的抗磨作用及作为磨损修复添加剂的应用研究 [J]. 中国表面工程, 2001, 14(3): 21-29.

[2] 卓洪,王文健,刘启跃. 不同纳米添加剂下 GCr15/45 钢自修复性能研究 [J]. 润滑与密封, 2007, 32(8): 47-51.

[3] Shchukin D G, Möhwald H. Self-repairing coatings containing active nanoreservoirs [J]. Complex Materials, 2007, 3(6): 926-943.

[4] Chen W G, Gao Y Z, Zhang H C, et al. Self-repairing characteristics of superfine powder of hydroxyl magnesium silicate on a worn steel surface [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2010, 38(4): 762-767.

[5] Yang C J, Chen G X, Hua Y, et al. Research on self-repairing effects of nanometer zinc additive in lubricant oil by uniform design method [J]. Acta

Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2009, 25(8): 582-586.

[6] Amendola, Vincenzo, Meneghetti, Moreno. Self-healing at the nanoscale [J]. Nanoscale, 2009, 1(1): 74-88.

[7] Zhang Y D, Yan J S, Sun L, et al. Friction reducing anti-wear and self-repairing properties of nano-Cu additive in lubricating oil [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(5): 74-79.

[8] 周仲荣,朱旻昊. 复合微动磨损 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2004.

[9] 刘启跃,周仲荣,石心余. 45 # 钢/GCr15 钢摩擦副的滚动磨损特性研究 [J]. 摩擦学学报, 2001, 21(1): 33-36.

[10] 张文成,王建荣,师瑞霞. 纳米粉体分散技术的研究 [J]. 现代商贸工业, 2009, 2: 284-285.

[11] 贾晓林,谭伟. 纳米粉体分散技术发展概况 [J]. 非金属矿, 2003, 26(4): 1-2.

作者地址: 成都市二环路北一段 111 号 610031
西南交通大学摩擦学研究所
Tel: (028) 8763 4304
E-mail: wwj527@163.com

• 学术动态 •

2012 年中国机器人焊接学术与技术交流会议将在北京举行

第九届“中国机器人焊接学术与技术交流会议”将于 2012 年 10 月 8~10 日在北京举办。会议由焊接分会机器人与自动化专委会、中国焊接协会汽车专委会、中国焊接熔焊工艺与设备专委会和焊接分会压力焊专委会联合主办,北京石油化工学院承办。

此次会议旨在为机器人焊接智能化技术、智能机器人、智能制造及相关应用领域的专家学者和专业技术人员提供一个相互交流的平台,将有国内外知名专家学者作相关领域最新学术与技术的研究进展报告、世界知名机器人公司介绍其最新焊接机器人技术进步报告、焊接机器人与自动化技术的应用状况交流报告。

为使会议的学术与技术交流更为广泛有效,已商定将会议论文集作为《上海交通大学学报》(EI 源刊)的特刊发表,出版时间为 2012 年 11 月,投稿截止日期为 2012 年 3 月 30 日。

(摘自 中国机械工程学会网)