

表面摩擦磨损与润滑

TiN/BN 与 AlN/BN 纳米混合添加剂 的摩擦学性能研究

孟凡善^{1,2}, 李征³, 程焯², 王文健^{1,2}, 刘启跃¹

(1. 先进驱动节能技术教育部工程研究中心, 成都 610031;

2. 西南交通大学 机械工程学院, 成都 610031;

3. 青岛理工大学(临沂)机电工程系, 山东 临沂 273400)

摘要: **目的** 探究 TiN/BN 与 AlN/BN 两类纳米混合添加剂在油润滑中的摩擦学性能, 分析纳米润滑油润滑机理。**方法** 以油酸作为分散剂, 提高纳米添加剂在基础油中的分散性能, 利用 MRS-10A 型四球摩擦磨损实验机对不同混合比例、不同添加浓度的 TiN/BN 与 AlN/BN 纳米润滑油进行摩擦学性能测试, 使用扫描电镜观察磨斑表面形貌, 用 EDS 和 XPS 检测磨斑表面元素种类及相应化合价态。**结果** 经油酸分散的混合纳米粒子的质量比为 1:1 时, 纳米润滑油表现出最好的抗磨减摩性能。其中 TiN/BN 纳米混合添加剂的质量分数为 0.6% 时, 磨斑直径和摩擦系数较基础油分别降低 34.97% 和 16.75%, 最大无卡咬负荷提高 65.96%; AlN/BN 纳米混合添加剂的质量分数为 0.2% 时, 磨斑直径和摩擦系数较基础油分别降低 24.49% 和 11.76%, 最大无卡咬负荷提高 38.30%。磨斑表面磨痕沟槽深度、宽度减小, 表面粗糙度明显降低。**结论** 分散在油液中的 AlN、BN、TiN 纳米粒子进入摩擦副间发挥承载支撑作用, 将滑动摩擦变为滑动-滚动混合摩擦, 降低摩擦磨损。进入摩擦副间的 AlN 纳米粒子由于高表面能特性, 沉淀吸附于摩擦表面凹坑处, 修复磨损表面, TiN、BN 纳米粒子与摩擦表面发生化学反应, 生成由 Fe-O、Ti-O、BO_x 及 TiN_xO_y 等物质所构成的自修复膜, 表现出较好的抗磨减摩及自修复性能。

关键词: 纳米添加剂; TiN/BN; AlN/BN; 油润滑; 减摩; 抗磨; 自修复

中图分类号: TH117.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)11-0259-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.11.028

Tribological Properties of TiN/BN and AlN/BN Nano Composite Particles as Additives

MENG Fan-shan^{1,2}, LI Zheng³, CHENG Zhuo², WANG Wen-jian^{1,2}, LIU Qi-yue¹

(1. Advanced Drive Energy Saving Technology Engineering Research Center under the Ministry of Education, Chengdu 610031, China; 2. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 3. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao University of Technology (Linyi), Linyi 273400, China)

收稿日期: 2019-02-25; 修订日期: 2019-03-08

Received: 2019-02-25; Revised: 2019-03-08

基金项目: 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项(2018YFE0109400); 青岛理工大学(临沂)自然科学基金项目(2017ZR006)

Fund: National Key R&D Program Intergovernmental Key Items for International Scientific and Technological Innovation Cooperation (2018YFE0109400); Qingdao Technological University (Linyi) Natural Science Foundation Project (2017ZR006)

作者简介: 孟凡善(1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为纳米润滑。

Biography: MENG Fan-shan (1994—), Male, Master, Research focus: nano-lubrication technology.

通讯作者: 王文健(1980—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为轮轨润滑剂设计。邮箱: wwj527@163.com

Corresponding author: WANG Wen-jian (1980—), Male, Doctor, Research professorship, Research focus: wheel rail lubricant design. E-mail: wwj527@163.com

ABSTRACT: The work aims to study the tribological properties of TiN/BN and AlN/BN nano-additives in oil lubrication and analyze the lubrication mechanism of nano-lubricating oil. Oleic acid was used as dispersant to improve the dispersibility of nano-additives in base oil, and the tribological properties of TiN/BN and AlN/BN nano-lubricants with different mixing ratios and concentrations were tested by MRS-10A four-ball friction and wear tester. SEM was used to observe the surface morphology of wear scar, and EDS and XPS were used to detect the types of elements on the surface of wear scar and corresponding valence states. When the mass ratio of nano-particles dispersed by oleic acid was 1 : 1, the nano-lubricating oil showed the best anti-wear and anti-friction performance. With the application of 0.6wt% TiN/BN mixed additives, the wear scar diameter and friction coefficient were reduced by 34.97% and 16.75%, respectively and the maximum non-sticking bite load was increased by 65.96%. While the wear scar diameter and friction coefficient were reduced by 24.49% and 11.76% and the maximum non-sticking bite load was increased by 38.30%, with the application of 0.2wt% AlN/BN composite additives. The depth and width of the grooves and the surface roughness were reduced with the application of nano composite additives. AlN, BN and TiN nanoparticles dispersed in oil play the role of bearing support between friction pairs, changing sliding friction into sliding-rolling mixed friction and reducing friction and wear. AlN nanoparticles entering the friction pairs are deposited and adsorbed in the pits of the friction surface to repair the worn surface due to its high surface energy characteristics. TiN and BN nanoparticles react with the friction surface to form a lubricating self-repairing film composed of Fe-O, Ti-O, BO_x and TiN_xO_y , which shows great anti-wear, anti-friction and self-repairing properties.

KEY WORDS: nano additives; TiN/BN; AlN/BN; oil lubrication; anti-friction; anti-wear; self-repairing

摩擦磨损在日常生产生活中时有发生,有效减小摩擦磨损,在能源日益紧张的今天显得尤为重要。润滑油作为降低摩擦系数、减小磨损最为常用的润滑方式,引起学者们极大关注。随着对润滑油研究的不断深入,人们发现向基础润滑油中加入极小量的 TiN、AlN、hBN 等纳米粒子可以有效提高润滑油摩擦学性能^[1-4]。纳米润滑油添加剂可以有效地提高润滑油的摩擦学特性,在节约能源、保护摩擦副基体材料等方面表现出巨大优势^[5]。

阮亭纲等^[6]向基础油中添加纳米 TiN 粒子,结果表明,纳米 TiN 可以有效提高基础油的摩擦学性能,并且在摩擦表面生成自修复膜。Podgornik 等^[7]分析了微纳米 BN 在铝-钢摩擦副中的摩擦磨损特性,当纳米 BN 添加量为 5% (质量分数) 时,可以有效降低磨损量,提升油膜承载能力。上述报道表明,具有润滑特性的纳米粒子以及适当的添加浓度,是纳米添加剂发挥润滑性能的关键,但是并没有完整解释纳米润滑机理。同时研究表明,混合纳米添加剂由于两类粒子间存在协同作用,可以发挥出更加优异的摩擦学特性^[8-9]。ZHENG 等^[10]验证了 WS_2/GP 不同添加浓度的润滑油抗磨减摩性能优于添加单一 WS_2 或 GP 的润滑油,证明了两种纳米粒子间协同作用的存在,但是并没有探究两种纳米粒子的最佳混合比例。文中利用四球摩擦磨损试验机分别探究了 TiN/BN 与 AlN/BN 两种纳米混合添加剂的最佳混合比例以及最佳添加浓度,解释了纳米润滑油润滑机理。研究结果可为开发设计实际应用的纳米润滑油提供一定的技术指导。

1 试验

1.1 配制润滑油

纳米添加剂为北京德科岛津公司提供的纳米 TiN (平均粒径为 20 nm, 99.99%)、纳米 AlN (平均粒径为 40 nm, 99.99%) 和纳米 BN (平均粒径为 50 nm, 99.99%)。由于纳米颗粒粒径大小与摩擦系数并无直接关系^[6],所以选择不同粒径的三种纳米粒子,在两两混合后作为润滑油添加剂,以发挥最佳抗磨、减摩及自修复性能。选用成都市科龙化工试剂厂提供的分析纯油酸(OA)作为分散剂,以提高纳米粒子在基础油液中的分散性能。基础油类型为广东中海南联能源有限公司提供的 500SN,钢球是由上海钢厂提供的直径为 12.7 mm 的 GCr15 二级标准钢球。

向 5 份基础油中分别添加 1% OA、0.6% TiN/BN、0.6% TiN/BN+1.2% OA、0.2% AlN/BN、0.2% AlN/BN+0.4% OA 配制不同添加剂类型的润滑油,用于研究油酸对润滑油摩擦学性能的影响。以油酸作为纳米 TiN/BN 和 AlN/BN 添加剂在基础油中的分散剂,分别称取 TiN 和 BN 纳米粒子 (TiN 与 BN 质量比分别为 0 : 1、1 : 2、2 : 3、1 : 1、3 : 2、2 : 1、1 : 0) 配制混合添加剂为 0.6% 的 TiN/BN 混合油液,然后向混合油液中加入 1.2% 的油酸分散剂,搅拌均匀后超声分散 30 min,制备 TiN/BN 润滑油,用于研究不同配比对摩擦学性能的影响。按照相同质量比配制混合添加剂为 0.2% 的 AlN/BN 混合油液。

1.2 摩擦学试验

试验在济南益华公司生产的 MRS-10A 型四球摩擦磨损试验机上进行, 试验参数: 载荷为 392 N, 转速为 600 r/min, 温度为 40 °C, 时间为 1 h, 长磨。每组试验均重复 3 次, 取平均值。油酸对润滑油摩擦学性能的影响结果如图 1 所示。由图 1 可以看出, 使用油酸作为分散剂, 可以提高纳米 TiN/BN 和纳米 AlN/BN 润滑油的抗磨减摩性能。

两组添加剂在不同配比时的摩擦学性能如图 2 所示。由图 2 可以看出, 两种混合纳米添加剂均在单

一粒子质量比 1 : 1 附近时 (其中 AlN:BN 为 2 : 3 时具有最佳抗磨性能, 考虑其减摩性能以及总体抗磨性能与配比 1 : 1 时区别不大, 故按配比 1 : 1 继续后续试验), 抗磨减摩效果最好, 表明 TiN 与 BN、AlN 与 BN 纳米粒子间具有协同作用, 且最佳配制为质量比 1 : 1。以 TiN 与 BN 质量比为 1 : 1, 配制 0%、0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.2% 的 TiN/BN 混合纳米润滑油, 分别加入 2 倍于纳米添加剂质量的油酸分散剂, 搅拌均匀后超声分散 30 min, 配制 TiN/BN 纳米润滑油。同样在纳米 AlN 和 BN 质量比为 1 : 1 的情况下配制 AlN/BN 纳米润滑油, 并按照上述试验参数进行试验。

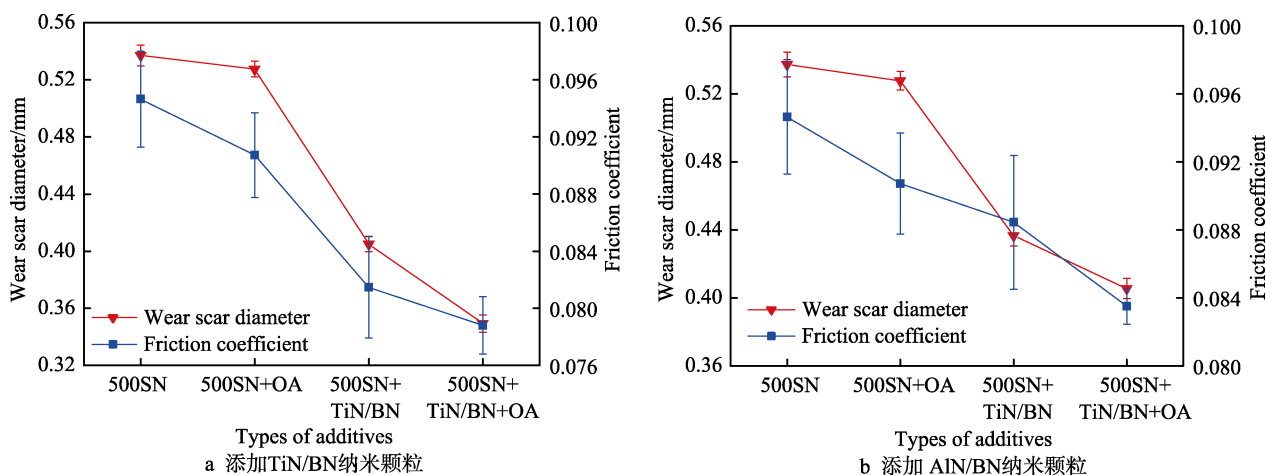


图 1 摩擦系数和磨斑直径随添加剂类型的变化

Fig.1 Variation of the friction factor and wear scar diameter with the additive type: a) addition of TiN/BN nanoparticles; b) addition of AlN/BN nanoparticles

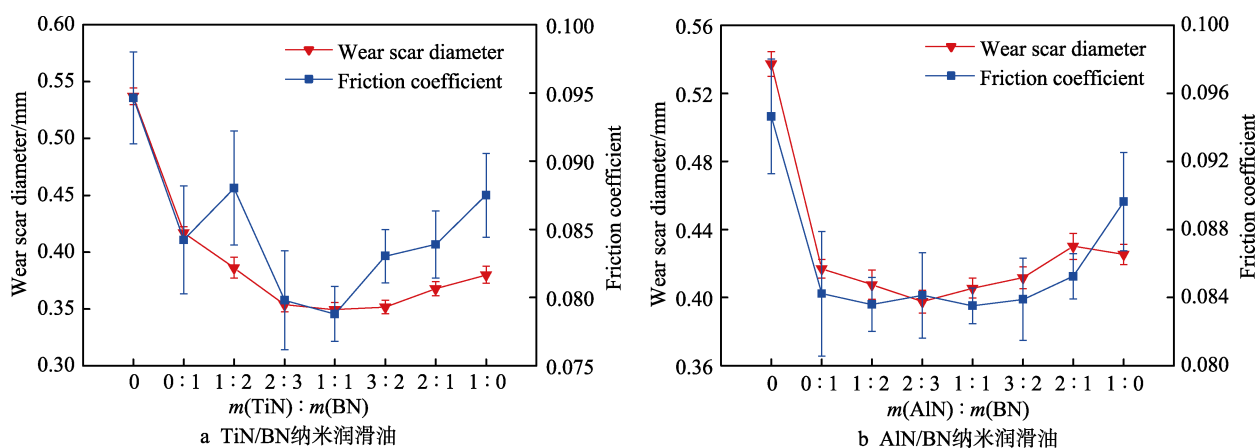


图 2 摩擦系数和磨斑直径随 $m(\text{TiN}) : m(\text{BN})$ 及 $m(\text{AlN}) : m(\text{BN})$ 比例的变化

Fig.2 Variation of the friction factor and wear scar diameter with the addition of $m(\text{TiN}) : m(\text{BN})$ in different proportions: a) TiN/BN nano-lubricating oil; b) AlN/BN nano-lubricating oil

2 结果与分析

2.1 纳米添加剂浓度对润滑性能的影响

由磨斑直径和摩擦系数 (见图 3) 可以看出, 加入纳米粒子可以有效降低磨斑直径和摩擦系数。具体

表现为随纳米添加剂浓度的增加, 磨斑直径和摩擦系数均出现先减小后增大的趋势。TiN/BN 纳米混合添加剂的质量分数为 0.6% 时, 磨斑直径和摩擦系数较基础油分别降低达 34.97% 和 16.75%; AlN/BN 纳米混合添加剂的质量分数为 0.2% 时, 磨斑直径和摩擦系数较基础油分别降低达 24.49% 和 11.76%。在

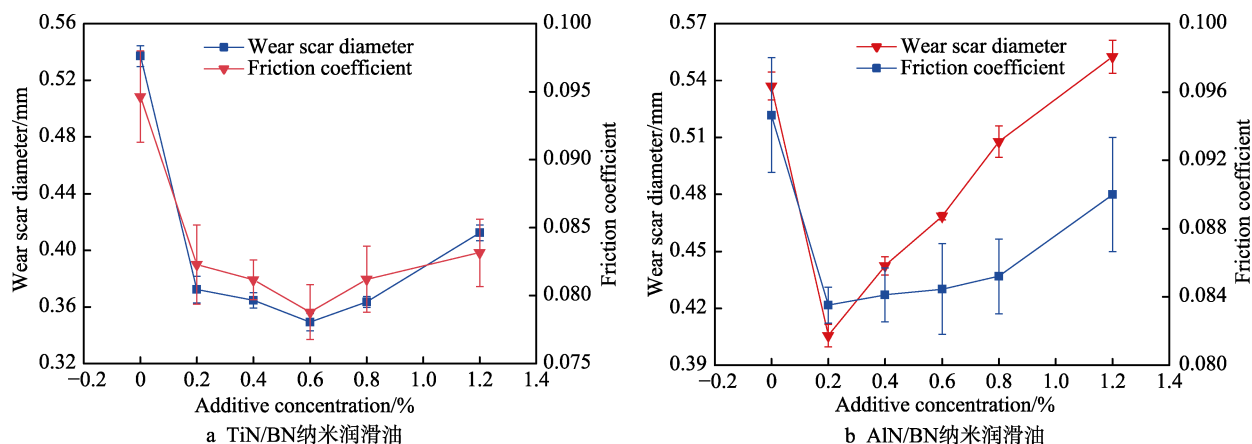


图3 摩擦系数和磨斑直径随添加剂质量分数的变化

Fig.3 Variation of the friction factor and wear scar diameter with the addition of nanoparticles in different mass fractions: a) TiN/BN nano-lubricating oil; b) AlN/BN nano-lubricating oil

AlN/BN 混合纳米粒子添加的质量分数为 1.2% 时, 抗磨性能完全丧失, 这是由于适量浓度的纳米粒子可以进入摩擦副, 发挥微轴承作用, 降低摩擦磨损。在添加浓度较高时, 粒子间间距变小, 由于纳米粒子表面能较高, 易发生团聚现象, 出现结块和化学固化作用^[11]。这种团聚块已不能起到类球轴承^[12]的作用, 而是类似于磨屑混杂于油液中, 在摩擦表面形成不稳定摩擦^[13-15], 破坏表面的润滑膜, 加剧摩擦表面之间的磨损, 造成摩擦系数和磨斑直径急剧增大。按照 GB 3142—82, 测试 0.6% TiN/BN 纳米润滑油和 0.2% AlN/BN 纳米润滑油极压性能, 最大无卡咬负荷较 500SN 型基础油 (470 N) 分别提高 65.96% (780 N) 和 38.30% (650 N)。

2.2 微观形貌分析

由扫描电镜图 (见图 4) 和磨斑二维轮廓曲线 (见图 5) 可以看出, 添加纳米粒子后, 磨斑表面划痕深度、宽度明显减小, 划痕沟槽变细变小, 表面粗糙度降低。这表明纳米粒子在摩擦副间起到承载支撑作用, 纳米粒子将两表面间直接接触时的滑动摩擦, 变为由纳米颗粒支撑的滚动-滑动混合摩擦形式^[16], 在一定程度上减小了摩擦磨损, 降低了表面粗糙度。在

基础油润滑时, 磨斑表面出现较明显的局部剥落, 而表面凹坑较少。这表明在摩擦过程中, 粘着引起的剥落及氧化磨损, 造成上表层起皮脱落。TiN/BN 和 AlN/BN 纳米润滑油润滑时, 磨斑表面均未发现粘着磨损的现象, 但是在磨斑表面出现很多条形凹坑。这表明在两钢球表面作相对运动时, 未及时排出的磨屑以及部分团聚的纳米粒子充当磨粒, 划伤摩擦表面。

2.3 磨斑表面成分分析

EDS 能谱图 (见图 6a) 中出现 Ti 元素特征峰, 并且 Ti 元素与 N 元素的含量比明显大于 1。同时对元素含量进行分析发现, 较基础油组, 纳米润滑油润滑表面 Fe 元素含量均有降低, 而 O 元素含量明显升高。说明在磨斑表面并不是简单的 Fe 和 Ti 元素发生化学反应, 还有 O 等元素的参与, 形成 Fe、Ti 等元素的混合氧化物吸附在摩擦表面, 证明纳米粒子参与了磨斑表面自修复膜的生成^[17]。这层膜可以将摩擦副分开, 避免直接接触, 有效抑制表面磨损的进一步发生, 也证明了扫描电镜照片磨斑尺寸及粗糙度不同的原因。同时通过表面元素分布 (见图 7a、b、d) 可以看出, Ti 元素与 B 元素分布均匀, 说明所添加的

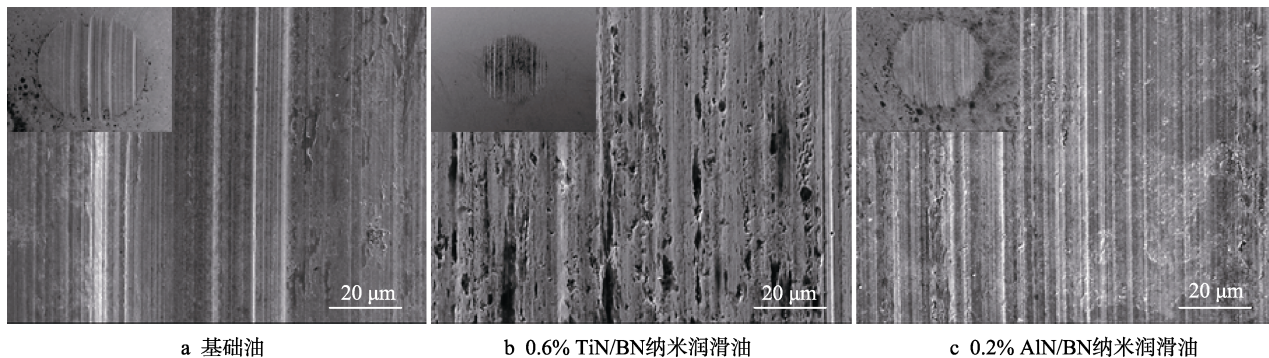


图4 添加不同类型纳米粒子后磨斑形貌

Fig.4 Morphologies of wear scar with the addition of different nanoparticles: a) Base oil; b) 0.6% TiN/BN nano-lubricating oil; c) 0.2% AlN/BN nano-lubricating oil

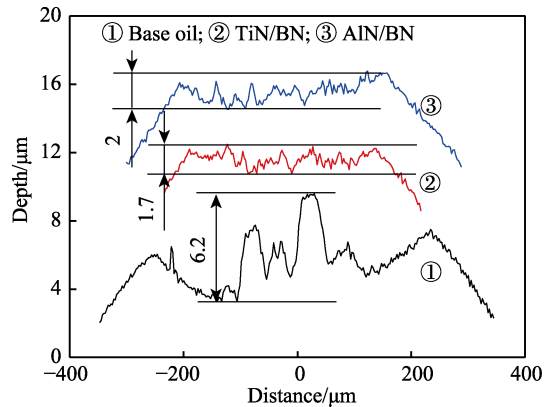


图 5 添加不同类型纳米粒子后磨斑的二维轮廓曲线
Fig.5 Two-dimensional profile curve of wear scar with the addition of different nanoparticles

TiN、BN 纳米粒子与摩擦副基体材料发生反应，生成了均匀的含 Ti 元素与 B 元素的自修复膜。

图 6b 中出现 Al 元素的特征峰，而在表面元素分布图（见图 7c）中，Al 元素主要集中分布在表面凹坑处，而不是均匀地分布在磨斑表面。这是因为氧化铁和铝的反应不易进行（氧化或置换反应必须在高温

等环境下才会发生），所以在摩擦表面相对运动时，纳米粒子并没有与摩擦副表面材料发生反应，所表现出来的减摩抗磨效果是因为纳米粒子尺寸较小，纳米材料能够起到微轴承的作用，降低摩擦。同时吸附和填充于磨损表面的 AlN 纳米粒子，起到修复摩擦副基体材料的作用。

对 0.6% TiN/BN 组磨斑进行 XPS 分析，检测到特征元素 Ti、B、N 的出现（见图 8a），这与 EDS 检测结果一致。对 Fe 元素峰进行分析发现，添加纳米粒子后，磨斑表面 Fe 元素含量明显降低（见图 8b、c），说明在摩擦表面覆盖有一层遮挡物薄膜。以外来污染碳（484.8 eV）作为基准，对原始数据进行荷电校准后，进一步对特征元素 Ti2p 分谱进行分峰拟合处理（见图 9a）。分峰后发现在 2p_{2/3} 和 2p_{1/2} 轨道均出现双拟合峰，选择 Ti2p_{3/2} 分析，在 2p_{3/2} 峰处拟合出峰值为 456.91 eV 和 458.70 eV 的两峰，认为是含钛氧化物的对应峰。原因是在 Ti 元素周围元素的电负性越大时，Ti 元素向高的结合能方向的化学位移越大，结合能的值也就越高，而元素的电负性是 B（2.04）< C（2.55）< N（3.04）< O（3.44）^[18]。

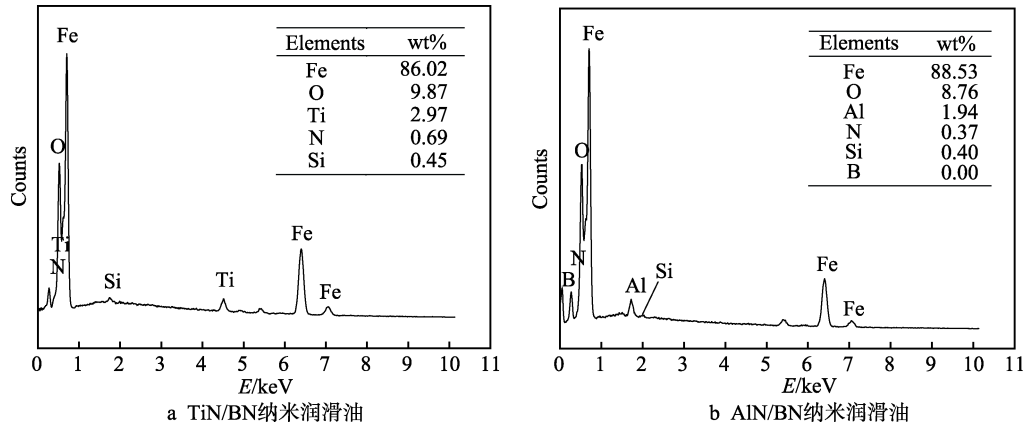


图 6 添加纳米粒子后磨斑表面 EDS 能谱
Fig.6 EDS spectra of the wear scar with the addition of nanoparticles:
a) TiN/BN nano-lubricating oil; b) AlN/BN nano-lubricating oil

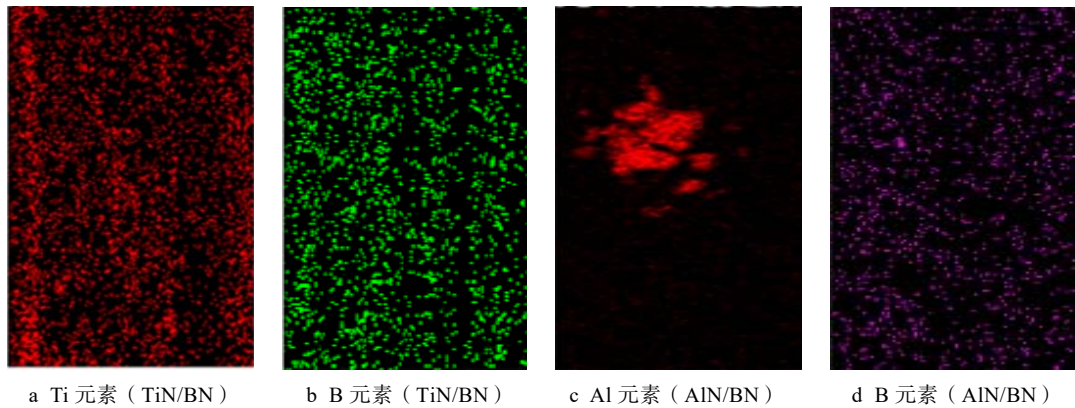


图 7 添加纳米粒子后磨斑元素分布
Fig.7 Distribution of elements on the wear scar with the addition of nanoparticles:
a) Ti element; b) B element; c) Al element; d) B element

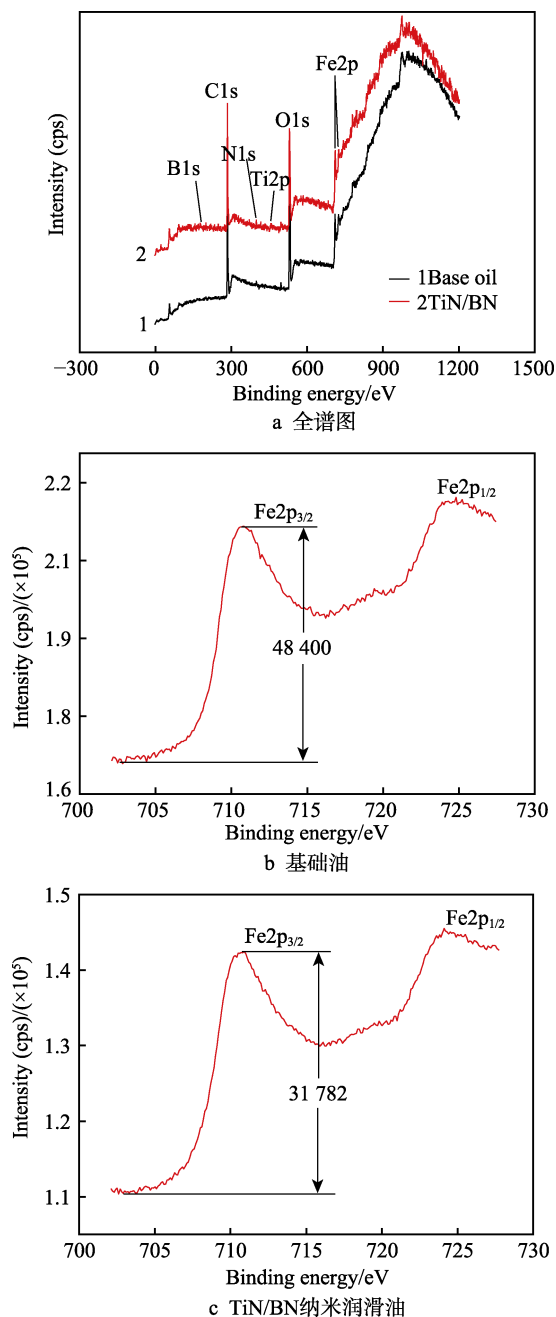


图 8 基础油和 TiN/BN 纳米润滑油润滑磨斑表面 XPS 全谱图与 Fe 谱图

Fig.8 XPS full spectra and Fe spectra of the wear scar after lubrication with base oil and TiN/BN nano-lubricating oil: a) Full spectra; b) Base oil; c) TiN/BN nano-lubricating oil

结合试验是在大气环境下进行, O 原子很容易替换掉 Ti-N 中的 N 原子而形成 TiN_xO_y (456.7~457.3 eV) 及 TiO_2 (458.5~459.3 eV) [19-21]。同时又参考了徐富春等[22]对 Ti^{3+} 、 Ti^{4+} 结合能的研究, Ti^{3+} 和 Ti^{4+} 所对应的 2p_{3/2} 轨道结合能分别是 456.5 eV 和 458.5 eV, 可以确定 2p_{3/2} 轨道出现的两峰 456.91 eV 和 458.70 eV 分别代表 TiN_xO_y 和 TiO_2 (见表 1)。

对 O、B 两特征元素分谱进行分峰拟合处理(见图 9b、c), 均出现多个拟合峰。如 O1s 出现峰值为 529.58 eV 和 530.50 eV 的两拟合峰[23], 说明在摩擦

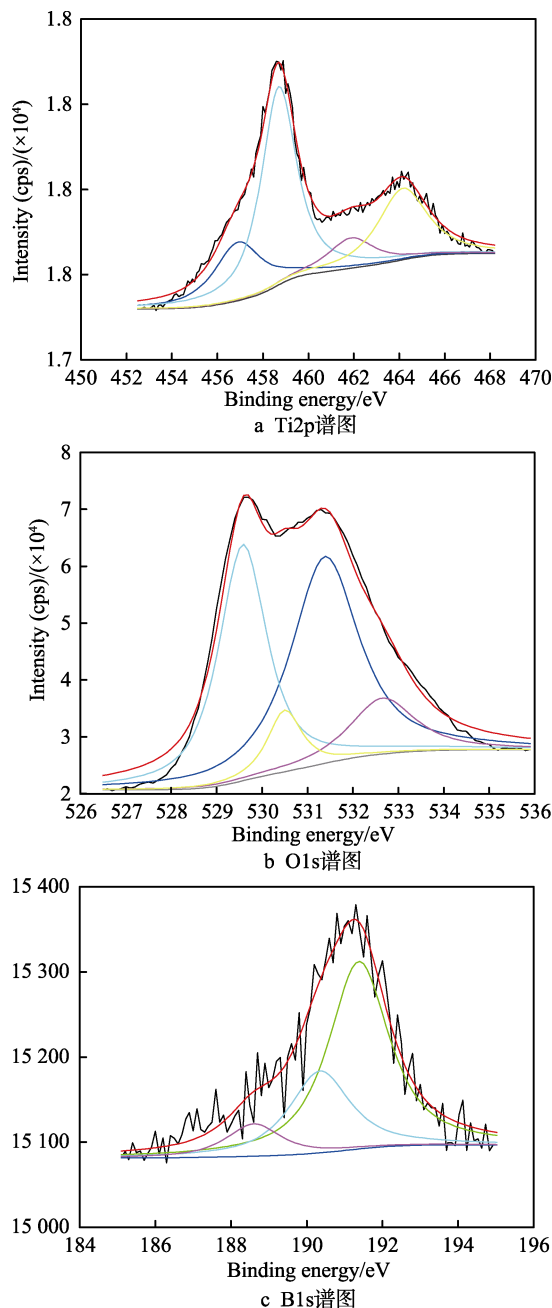


图 9 TiN/BN 纳米润滑油润滑磨斑表面 XPS 分谱拟合图
Fig.9 XPS fitted spectra of the wear scar surface after lubrication with TiN/BN nano-lubricating oil: a) Ti2p spectrum; b) O1s spectrum; c) B1s spectrum

表 1 磨斑表面 Ti (2p_{3/2}) 的 XPS 分析结果
Tab.1 XPS analysis results of Ti (2p_{3/2}) on the wear scar surface

Position/eV	FWHM	Area	Compounds
456.91	2.50	505.99	TiN_xO_y
458.70	1.85	1264.55	TiO_2

过程中生成有钛的氧化物及三氧化二铁(见表 2)。B1s 出现峰值为 188.60 eV 和 191.38 eV 的两拟合峰, 说明 B 元素与 Fe、O 元素反应生成了对应化合物(见表 3)。综合对上述四种元素的分析, 可以说明在磨

表 2 磨斑表面 O (1s)的 XPS 分析结果
Tab.2 XPS analysis results of O (1s) on
the wear scar surface

Position/eV	FWHM	Area	Compounds
529.58	1.27	77 868.86	Ti-O
530.50	0.85	13 645.86	Fe-O
531.39	1.77	95 008.41	C-O
532.65	1.70	24 518.00	O-H

表 3 磨斑表面 B (1s)的 XPS 分析结果
Tab.3 XPS analysis results of B (1s) on
the wear scar surface

Position/eV	FWHM	Area	Compounds
188.60	1.70	95.08	Fe ₂ B
190.35	1.90	268.74	BN
191.38	1.90	615.33	BO _x

斑处发生了化学反应, 生成了含有 Fe、Ti、B 等多种氧化物及有机物共存的物质^[18,20,24-25]。至此可以说明, 所添加的纳米 TiN 与 BN 粒子与摩擦副基体材料在摩擦过程中, 在磨斑表面形成一层极薄的自修复膜^[26], 保护金属表面进一步磨损, 同时对磨损的金属表面起到修复作用。

对 0.2% AlN/BN 组磨斑表面进行 XPS 分析, 只是检测到微量的 N 和 B 元素, 并未检测到特征元素 Al。结合 EDS 面扫描元素分布图 (见图 7d), 表明在 AlN/BN 混合纳米粒子中, 只有 BN 与摩擦副基体材料发生微弱反应, 而纳米粒子 AlN 并不与摩擦副基体材料发生反应, 纳米粒子 AlN 因其尺寸小, 在摩擦副间起到微轴承的作用。

3 结论

1)在纳米粒子混合质量比为 1 : 1 时, 0.6%TiN/BN 和 0.2% AlN/BN 纳米混合润滑油表现出最优异摩擦学性能, 较基础油磨斑直径和摩擦系数分别降低 34.97%、24.49%和 16.75%、11.76%, 最大无卡咬负荷提高 65.96%和 38.30%, 摩擦表面粗糙度明显降低。

2) 进入摩擦副间的纳米粒子 AlN、BN、TiN 起到微轴承作用, 将滑动摩擦变为滑动-滚动混合摩擦, 降低摩擦磨损。

3)纳米粒子 BN、TiN 与摩擦表面发生化学反应, 生成由 Fe-O、Ti-O、BO_x 及 TiN_xO_y 等所构成的自修复膜, 防止摩擦副基体材料进一步磨损。纳米粒子 AlN 由于高表面能特性沉淀吸附于摩擦表面凹坑处, 起到修复摩擦副基体材料的作用。

参考文献:

[1] SHAFI W K, CHAROO M S. "Nanolubrication systems:

an overview"[J]. Materials today: Proceedings, 2018, 5(9): 20621-20630.

[2] 陈运亭, 章于川, 钱家盛, 等. 纳米 AlN 润滑油抗磨添加剂的制备与应用研究[J]. 安徽大学学报: 自然科学版, 2010, 34(6): 82-87.

CHEN Yun-ting, ZHANG Yu-chuan, QIAN Jia-sheng, et al. Nanometer of AlN lube antiwear additive preparation and application study[J]. Journal of Anhui University: Natural science edition, 2010, 34(6): 82-87.

[3] 周立涛, 刘伟. Al₂O₃、六方 BN 纳米润滑油的摩擦学性能试验研究[J]. 润滑与密封, 2007, 32(2): 159-162.

ZHOU Li-tao, LIU Wei. Research on the friction behavior of lubricant oil contained Al₂O₃ and six squares BN nanometer grain[J]. Lubrication engineering, 2007, 32(2): 159-162.

[4] POLCAR T, KUBART T, NOVÁK R, et al. Comparison of tribological behaviour of TiN, TiCN and CrN at elevated temperatures[J]. Surface and coatings technology, 2005, 193(1): 192-199.

[5] NAIK M P, PADAL K T B. Friction and wear properties of lubricating oil with nanoparticles additives a review[J]. International research journal of engineering and technology, 2018, 5(9): 45-47.

[6] 阮亭纲, 周桂源, 谢先东, 等. 钛基纳米润滑添加剂的减摩抗磨及自修复特性对比[J]. 中国表面工程, 2015, 28(4): 47-53.

RUAN Ting-gang, ZHOU Gui-yuan, XIE Xian-dong, et al. Comparison of friction reducing anti-wear and self-repairing properties of different Ti-base nanometer lubricating oil additives[J]. China surface engineering, 2015, 28(4): 47-53.

[7] PODGORNIK B, KAFEXHIU F, KOSEC T, et al. Friction and anti-galling properties of hexagonal boron nitride (h-BN) in aluminium forming[J]. Wear, 2017, 388: 2-8.

[8] YE Y D, KURE-CHU S, SUN Z Y, et al. Self-lubricated nanoporous TiO₂-TiN films fabricated on nanocrystalline layer of titanium with enhanced tribological properties[J]. Surface and coatings technology, 2018, 351: 162-170.

[9] ABDULLAH M I H C, ABDOLLAH M F B, AMIRUDDIN H, et al. Optimization of tribological performance of hBN/Al₂O₃ nanoparticles as engine oil additives[J]. Procedia engineering, 2013, 68: 313-319.

[10] ZHENG D, WU Y, LI Z, et al. Tribological properties of WS₂/graphene nanocomposites as lubricating oil additives [J]. RSC advances, 2017, 7(23): 14060-14068.

[11] LUO T, WEI X W, ZHAO H Y, et al. Tribology properties of Al₂O₃/TiO₂ nanocomposites as lubricant additives[J]. Ceramics international, 2014, 40(7): 10103-10109.

[12] 阮少军, 费逸伟, 吴楠, 等. 润滑剂润滑机理分析[J]. 化工时刊, 2017, 31(8): 38-42.

RUAN Shao-jun, FEI Yi-wei, WU Nan, et al. Analysis oflubrication mechanism about lubricant[J]. Chemical industry times, 2017, 31(8): 38-42.

[13] HUANG H D, TU J P, GAN L P, et al. An investigation on tribological properties of graphite nanosheets as oil additive[J]. Wear, 2005, 261(2): 140-144.

- 2011, 271(9-10): 2438-2447.
- [4] BAUMANN G, KNOTHE K, FECHT H J. Surface modification, corrugation and nanostructure formation of high speed railway Tracks[J]. Nanostructured materials, 1997, 9(1): 751-754.
- [5] LEWIS R, OLOFSSON U. Mapping rail wear regimes and transitions[J]. Wear, 2004, 257(7): 721-729.
- [6] DING H H, FU Z K, WANG W J, et al. Investigation on the effect of rotational speed on rolling wear and damage behaviors of wheel/rail materials[J]. Wear, 2015, 330-331: 563-570.
- [7] HE C G, HUANG Y B, MA L, et al. Experimental investigation on the effect of tangential force on wear and rolling contact fatigue behaviors of wheel material[J]. Tribology international, 2015, 92: 307-316.
- [8] KALOUSEK J, FEGREDO D M, LAUFER E E. The wear resistance and worn metallography of pearlite, bainite and tempered martensite rail steel microstructure of high hardness[J]. Wear, 1985, 105: 199-222.
- [9] CLAYTON P, DEVANATHAN R. Rolling-sliding wear behavior of a chromium molybdenum rail steel in pearlitic and bainitic conditions[J]. Wear, 1992, 156: 121-131.
- [10] JHA A K, PRASAD B K, MODI O P, et al. Correlating microstructural features and mechanical properties with abrasion resistance of a high strength low alloy steel[J]. Wear, 2003, 254(1): 120-128.
- [11] MA L, HE C G, ZHAO X J, et al. Study on wear and rolling contact fatigue behaviors of wheel/rail materials under different slip ratio conditions[J]. Wear, 2016, 366-367: 13-26.
- [12] 潘睿, 陈春焕, 任瑞铭. 一种白层组织的扫描电镜样品制备方法: 中国, CN105242075A[P]. 2016-01-13.
- PAN Rui, CHEN Chun-huan, REN Rui-ming. A method of preparing sem specimen including white etching layer: China, CN105242075A[P]. 2016-01-13.
- [13] PAN R, ZHAO X, LIU P T, et al. Micro-mechanism of polygonization wear on railroad wheels[J]. Wear, 2017, 392-393: 213-220.
- [14] 杨兴宽, 刘颖鑫, 武小鹏, 等. 机车车轮复合超声滚压表面强化工艺研究[J]. 铁道技术监督, 2018, 46(8): 36-39.
- YANG Xing-kuan, LIU Ying-xin, WU Xiao-peng, et al. Research on composite ultrasonic rolling surface strengthening technology of locomotive wheels[J]. Railway technical supervision, 2018, 46(8): 36-39.
- [15] 陈冠国. 金属材料的硬度与磨损[J]. 华北理工大学学报(自然科学版), 1990(3): 75-81.
- CHEN Guan-guo. Hardness and wear of metallic materials[J]. Journal of north China University of Science and Technology (Natural science edition), 1990(3): 75-81.

(上接第 265 页)

- [14] ZHANG B S, XU Y, GAO F, et al. Sliding friction and wear behaviors of surface-coated natural serpentine mineral powders as lubricant additive[J]. Applied surface science, 2011, 257(7): 2540-2549.
- [15] HU Z S, DONG J X. Study on antiwear and reducing friction additive of nanometer titanium oxide[J]. Wear, 1998, 31(7): 355-360.
- [16] LEE K, HWANG Y, CHEONG S, et al. Understanding the role of nanoparticles in nano-oil lubrication[J]. Tribology letters, 2009, 35(2): 127-131.
- [17] 高传平. 磁性和粘土纳米颗粒在润滑油中的摩擦学性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- GAO Chuan-ping. Tribological properties of magnetic and clay nanoparticles in lubricating oil[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [18] 孙海珍. TiBCN 高温陶瓷的 XPS 分析[J]. 现代技术陶瓷, 2017, 38(2): 136-141.
- SUN Hai-zhen. XPS analysis of TiBCN high-temperature ceramics[J]. Advanced ceramics, 2017, 38(2): 136-141.
- [19] 刘洪喜, 蒋业华, 詹兆麟, 等. PIII 复合强化处理轴承钢表面 TiN 膜层的 XPS 表征[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(9): 2585-2589.
- LIU Hong-xi, JIANG Ye-hua, ZHAN Zhao-lin, et al. XPS characterization of TiN layer on bearing steel surface treated by plasma immersion ion implantation and deposition technique[J]. Spectroscopy and spectral analysis, 2009, 29(9): 2585-2589.
- [20] PRAKASH A, SUNDARAM K B. Optical and XPS studies of BCN thin films by co-sputtering of B₄C and BN targets[J]. Applied surface science, 2017, 396: 484-491.
- [21] 杜志惠, 崔振铎, 朱胜利, 等. 钛合金阳极氧化膜的 XPS 研究[J]. 宇航材料工艺, 2009, 39(6): 67-70.
- DU Zhi-hui, CUI Zhen-duo, ZHU Sheng-li, et al. XPS study of anodic oxide film on Ti alloy[J]. Aerospace materials & technology, 2009, 39(6): 67-70.
- [22] 徐富春, 王水菊, 林秀华, 等. 多弧离子镀 TiN 与不同金属基材间的接触界面与表面特性[J]. 化学物理学报, 2002, 15(1): 69-74.
- XU Fu-chun, WANG Shui-ju, LIN Xiu-hua, et al. The contact interface and surface characters between multiarc ion plating TiN and different base materials[J]. Chinese journal of chemical physics, 2002, 15(1): 69-74.
- [23] ZHOU Y, CAI Z B, PENG J F, et al. Tribo-chemical behavior of eutectoid steel during rolling contact friction [J]. Applied surface science, 2016, 388: 40-48.
- [24] BABA K, HATADA R. Synthesis and properties of TiO₂ thin films by plasma source ion implantation[J]. Surface & coatings technology, 2001, 136(1): 241-243.
- [25] PANAYIOTATOS Y, LOGOTHETIDIS S, HANDREA M, et al. Homogeneous and amorphous sputtered sp³-bonded BN films at RT: A stress, spectroscopic ellipsometry and XPS study[J]. Diamond and related materials, 2003, 12(3): 1151-1156.
- [26] 许一, 徐滨士, 史佩京, 等. 微纳米减摩自修复技术的研究进展及关键问题[J]. 中国表面工程, 2009, 22(2): 7-14.
- XU Yi, XU Bin-shi, SHI Pei-jing, et al. Progress and key issues of micro-and nanoscale anti-friction self-repairing technology[J]. China surface engineering, 2009, 22(2): 7-14.