

速度和载荷对脂润滑 2Cr13 钢离子渗氮层 摩擦学行为的影响

杨剑群^{1, 2*}, 刘 勇¹, 李兴冀¹, 王黎钦², 叶铸玉¹, 杨德庄¹, 何世禹¹
(1. 哈尔滨工业大学 空间环境材料行为及评价技术重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 利用销-盘式摩擦磨损试验机对不同速度和载荷条件下 PFPE 脂润滑 2Cr13 钢离子渗氮层进行了系统的真空滑动摩擦磨损试验. 采用扫描电子显微镜 (SEM)、X 射线光电子能谱仪 (XPS) 和傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 分别对磨损表面的形貌、化学状态及润滑脂的成分进行分析. 结果表明: 随着载荷和滑动速度的增加, 脂润滑渗氮层的磨损机制由轻微磨损向轻微复合磨损机制转变. 在真空摩擦磨损过程中 2Cr13 钢离子渗氮层与 PFPE 润滑脂发生化学反应, 并有 FeF_3 生成, 促进 PFPE 润滑脂发生降解, 形成酸性的氟化物. 增加载荷和速度会加速渗氮层与润滑脂之间的反应, 进一步促进润滑脂的降解.

关键词: 渗氮层; PFPE 润滑脂; 真空环境; 磨损机制

中图分类号: TH17.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2013)01-0070-08

The Effect of Velocity and Load on the Tribological Behavior of the Plasma – nitrated Layer on 2Cr13 Steel under Grease – lubricated Conditions in Vacuum

YANG Jian – qun^{1, 2*}, LIU Yong¹, LI Xing – ji¹, WANG Li – qin²,
YE Zhu – yu¹, YANG De – zhuang¹, HE Shi – yu¹

(1. National Key Laboratory of Science and Technology in Materials Behavior and Evaluation under Space Environment,
Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang 150001, China

2. School of Mechatronics, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang 150001, China)

Abstract: The friction and wear tests of the plasma – nitrated layer on a 2Cr13 steel under perfluoropolyether (PFPE) type grease – lubricated condition in vacuum were conducted on a pin – on – disk tribometer. The morphologies of the worn surfaces were observed by using scanning electron microscopy. The chemical states of typical elements on the worn surfaces were examined by means of X – ray photoelectron spectroscopy. The chemical compositions of grease before and after friction tests were analyzed by using fourier transform infrared spectroscopy. Experimental results show that under grease – lubricated condition, a transition of wear mechanisms from a mild wear to a mixed mild wear with increasing the normal load and the sliding velocity was observed. Tribochemical reactions between the nitrated layer and PFPE grease during sliding in vacuum gave birth to the product of FeF_3 . FeF_3 can be a catalyst to promote the degradation of PFPE grease to release acid fluorides. Increasing the normal load and the sliding velocity would accelerate the reactions between the nitrated layer

Received 8 June 2012, revised 13 November 2012, accepted 4 December 2012, available online 28 January 2013.

* Corresponding author. E – mail: fox1225@163.com, Tel: +86 – 451 – 86412462.

The project was supported by the National Key Basic Research Program of China (973) (2013CB632305) and the Post – doctoral Science Foundation (2012M52073).

国家 973 计划项目 (2013CB632305) 和博士后科学基金 (2012M520733) 资助.

and grease, and further promote the degradation of grease.

Key words: nitrided layer, PFPE grease, vacuum environment, wear mechanism

2Cr13 马氏体型不锈钢是空间摩擦副(如齿轮)常用的候选材料,具有抗腐蚀、力学性能优异等优点,应用前景广阔.但由于 2Cr13 不锈钢含碳量较低,耐磨性较差,在一些耐磨性要求较高的场合,必须经表面强化才能使用.离子渗氮可以使不锈钢表层的组织结构发生变化,在不锈钢表层形成高硬度的渗氮层,极大地提高了的耐磨性^[1-4].在渗氮层的基础上进行润滑将有利于充分发挥渗氮层耐磨损与润滑剂降低摩擦系数的双重效果.目前,对于渗氮层在润滑条件下的摩擦磨损性能已引起国内外许多学者的关注^[5-10].以往的研究表明^[6-8],渗氮层与润滑剂两种方法联合使用会产生协同作用.马雁声等^[6]对渗氮 45# 钢与润滑油中极压添加剂之间的相互作用进行了研究.结果表明,渗氮层与添加剂不仅在提高承载能力方面具有明显的协同效果,而且在减小摩擦磨损方面也具有较好的协同作用.文献^[7-8]分别较为详细地研究了离子渗氮 45# 钢和 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢在油润滑条件下的摩擦磨损性能.研究表明,在摩擦过程中,渗氮层与润滑油发生了摩擦化学反应,所生成的反应膜有利于使其表现出优异的摩擦学性能.但上述文献未针对速度和载荷对润滑条件下渗氮层的摩擦学行为的影响进行研究. Jisheng 等^[9]的工作表明,油润滑离子渗氮 CrMo 钢的润滑机制和磨损机制取决于载荷,且在混合润滑和边界润滑条件下,磨损率随着载荷的增加而增加,而摩擦系数随载荷呈非单调变化.另外,文献^[10]研究了不同速度和载荷条件下油润滑离子渗氮 AISI410 钢的滑动磨损行为.研究结果表明,油润滑离子渗氮 AISI410 钢的平均摩擦系数随载荷与滑动速度的增加略有增加,油润滑能够有效地降低离子渗氮 AISI410 钢的滑动磨损及磨损表面的温度.迄今为止,国内外对渗氮层在脂润滑条件下的摩擦磨损性能及磨损机理的研究,尤其是针对速度和载荷的影响,尚未见报导.因此,针对 2Cr13 钢渗氮层空间应用的需要,有必要深入研究速度和载荷对真空中脂润滑条件下渗氮层的摩擦磨损行为及渗氮层与润滑脂之间的相互作用.

1 实验部分

1.1 材料及制备

试验材料选择 2Cr13 马氏体型不锈钢.离子渗

氮前样品进行调质处理,工艺为:在 1 030℃ 加热并保温 45 min 后油冷淬火,然后进行 580 ± 10 °C 回火,保温时间为 120 min.圆盘上下表面进行离子渗氮.经调质处理将 2Cr13 钢分别机械加工成圆盘和销试样,销和盘试样的形状与尺寸如图 1 所示.机械加工后,所有试样表面进行研磨抛光.盘和销试样还要经过在丙酮中超声波清洗 15 min,烘干后以备进行渗氮处理.离子渗氮工艺如下:渗氮温度为 490 °C,保温时间为 30 h,渗氮气氛的成分为 N₂: H₂ = 2: 3.离子渗氮处理后,试样表面的粗糙度为 0.45 μm.

采用日本进口的完全氟化的真空润滑脂.此润滑脂以直链的全氟聚醚(PFPE)为基础油和聚四氟乙烯(PTFE)等作为稠化剂,其主要物理化学性能如下:白色,密度 2.0 g/cm³,工作温度范围 - 65 ~ 250 °C,黏度(20 °C)为 255 cSt,析油量(200 °C, 24 h)为 8.0%,蒸发量(200 °C, 24 h)为 0.2%,基础油蒸汽压(20 °C)为 4 × 10⁻¹⁰ Pa.

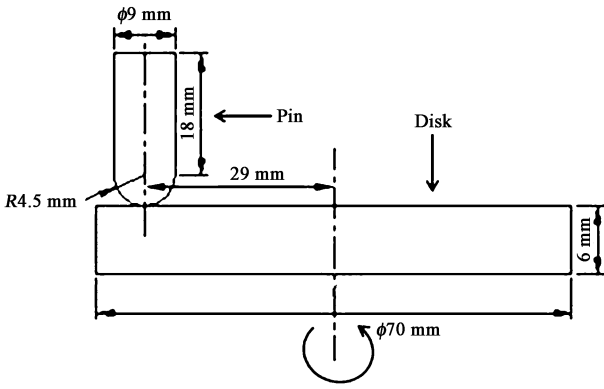


Fig. 1 Shapes and sizes of the pin and disk samples

图 1 2Cr13 不锈钢盘和销试样的形状和尺寸

1.2 试验方法

采用 Philips X' Per 型 Cu 靶 X 射线衍射仪(XRD)对气体氮化 2Cr13 钢对渗氮层表面进行物相分析.采用 HVS - 1000 型号的数字显微硬度计测量渗氮层硬度.

摩擦磨损试验采用销 - 盘式(УТИ ТВ - 1000)真空摩擦磨损试验机.摩擦磨损试验条件如下:真空压强小于 10⁻⁴ Pa,初始温度为 25 ± 5 °C,法向载荷为 10 ~ 90 N,滑动速度为 0.2 ~ 1.6 m/s,滑动距离为 2 000 m.润滑脂均匀地涂抹在渗氮盘试样表面,厚度约为 4.5 mm.摩擦磨损试验后,利用扫描电子显

显微镜 (SEM) 和 X 射线光电子能谱仪 (XPS) 分别对磨损表面形貌和成分进行分析. 采用傅立叶变换红外光谱仪 (FTIR) 对经过摩擦磨损后的润滑脂结构进行分析. 利用光学金相显微镜 (OM) 测量磨痕宽度. 选用三氯三氟乙烷溶液对脂润滑渗氮盘进行彻底清洗. 清洗时, 首先将渗氮盘在三氯三氟乙烷溶液中浸泡 30 min, 使润滑脂充分溶解, 然后在丙酮溶液中利用超声波清洗.

2 结果与讨论

2.1 渗氮层的硬度及显微结构

图 2 示出了 2Cr13 钢离子渗氮层的 XRD 结果. 由图 2 可见, 化合物层最表面主要为 γ' -Fe₄N 和少量的 ε -Fe₃N 和 CrN 两相组成. 离子氮化后样品表面显微硬度由 HV_{0.1}276 提高到 HV_{0.1}1 300 左右, 其原因在于表面形成了 γ' -Fe₄N、 ε -Fe₃N 和 CrN 相.

2.2 脂润滑渗氮层的真空中摩擦磨损特性

图 3 示出了在真空中不同滑动速度与载荷条件下, 脂润滑离子渗氮 2Cr13 钢与自身对磨的摩擦力

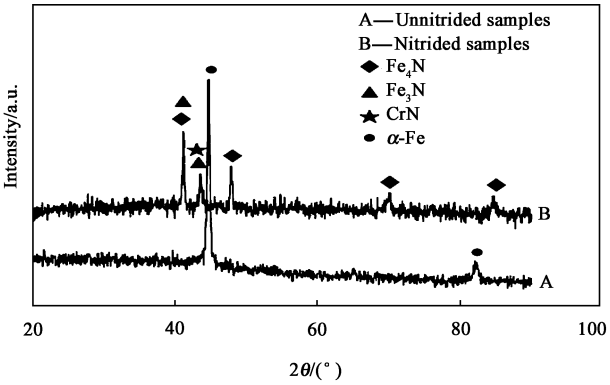


Fig. 2 X-ray diffraction patterns of plasma-nitrided and unnitrided 2Cr13 samples
图 2 2Cr13 钢离子渗氮样品和未渗氮样品的 X 射线衍射谱

随滑动距离变化的曲线. 在给定的滑动速度条件下, 随着法向载荷的增加, 摩擦力的波动明显增强, 如图 3(a~b) 所示. 在给定的载荷条件下, 不同滑动速度时摩擦力随滑动距离的变化呈现相似的规律, 如图 3(c~d) 所示. 低载荷 10N 时, 不同滑动速度的

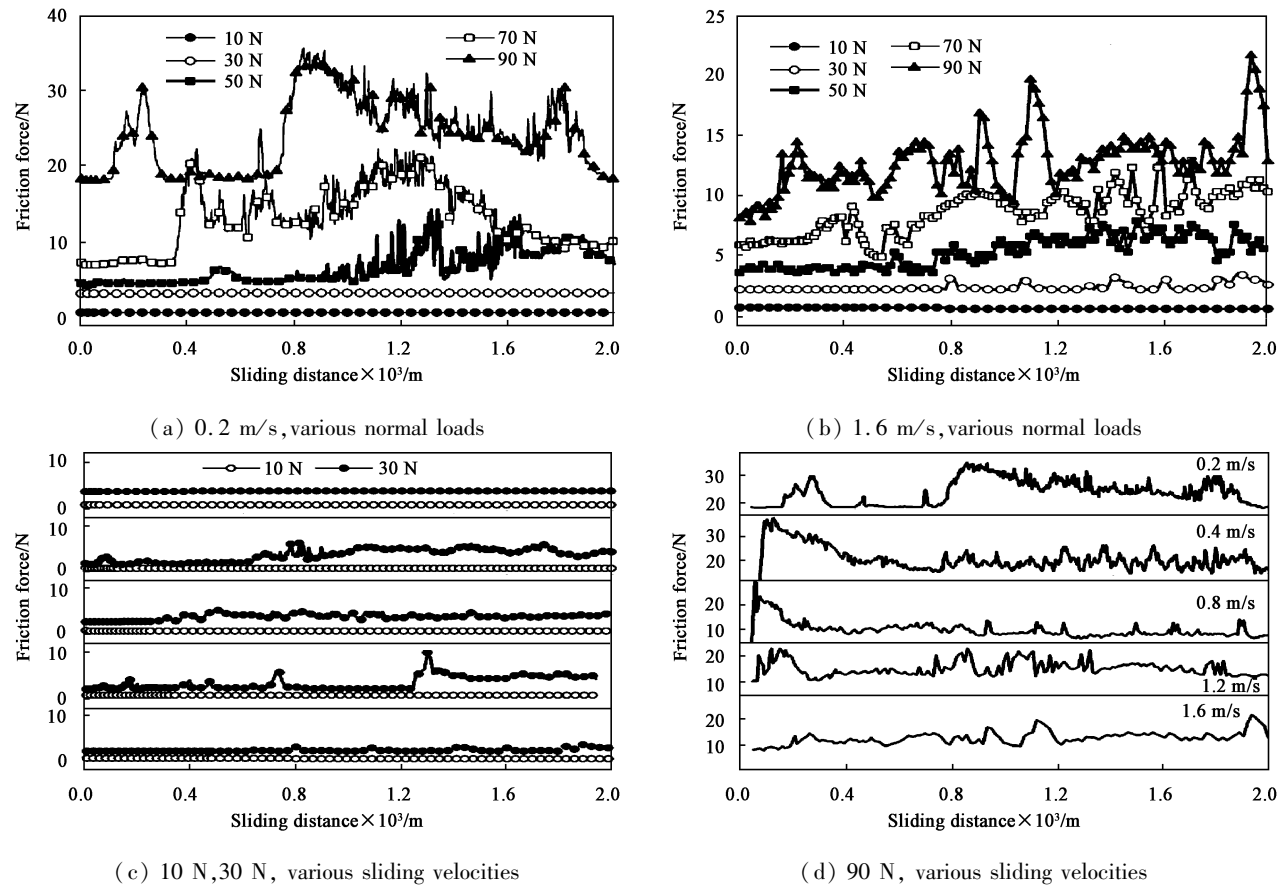


Fig. 3 Friction forces as a function of sliding distance for the self-mated plasma-nitrided 2Cr13 samples under dry sliding conditions for various sliding velocities and normal loads under grease lubrication in vacuum
图 3 脂润滑离子渗氮 2Cr13 钢在真空中不同试验条件下摩擦力随滑动距离变化

摩擦力均不随滑动距离的变化而变化;高载荷 90 N 时,不同滑动速度下摩擦力的波动性加剧。

图 4 示出了脂润滑离子渗氮 2Cr13 钢相互对摩擦副在真空中不同滑动速度下的平均摩擦系数随法向载荷的变化曲线。可见,在给定滑动速度下,平均摩擦系数随法向载荷的变化规律相似,均随着法向载荷的增加而明显增大。平均摩擦系数随滑动速度的增加有所降低(低载荷 10 N 时除外),并且其降低幅度随载荷增加而增大。综合分析图 3 和图 4 可知,与滑动速度相比,载荷对 2Cr13 钢离子渗氮层摩擦磨损行为的影响较为明显。

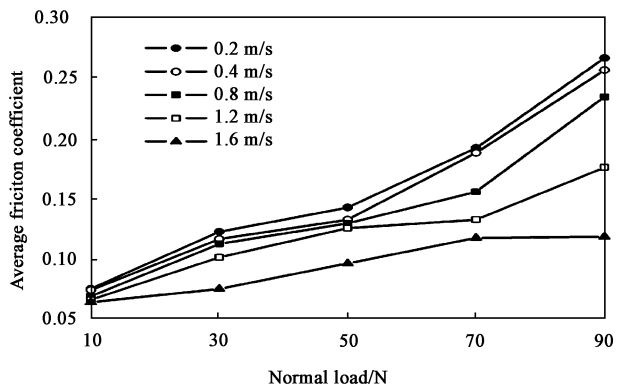


Fig. 4 Average friction coefficient of nitrided 2Cr13 steel sliding against itself as a function of normal load for various sliding velocities under grease lubrication in vacuum

图 4 真空中脂润滑时离子渗氮 2Cr13 钢相互对摩擦副在不同滑动速度和载荷下的平均摩擦系数的变化

图 5 示出了脂润滑时离子渗氮 2Cr13 钢盘在真空中不同滑动速度和载荷下的磨痕宽度。由图 5 可见,在试验的载荷与滑动速度范围内,渗氮盘的磨痕宽度变化范围不大。在相同滑动速度下,渗氮盘的磨痕宽度随法向载荷的增加而略有增加。当法向载荷为 10 N 时,不同滑动速度下磨痕宽度几乎相同。当法向载荷高于 10 N 时,相同法向载荷的磨痕宽度随滑动速度的增加而略有降低。

SEM 观察发现,在不同滑动速度和小于 90 N 法向载荷的条件下,渗氮盘和销试样的磨损表面分别具有相似的形貌特征。图 6 示出了离子渗氮 2Cr13 钢盘试样在真空中脂润滑条件下法向载荷小于 90 N 时不同滑动速度的清洗后磨损形貌。由图 6 可见,渗氮盘经真空脂润滑摩擦磨损后其表面磨损较轻,部分表面被抛光,呈现出大面积的较为光滑区域。同时,仍然能在磨损表面上观察到原始表面的存

在。由上述分析可推知,载荷小于 90 N 时,离子渗氮 2Cr13 钢盘试样在真空脂润滑条件下磨损机制为具有微切削特征的轻微磨损。

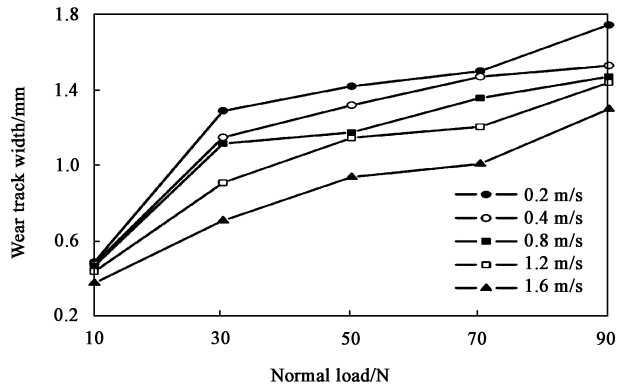


Fig. 5 Wear track width of the plasma nitrided 2Cr13 steel disks as a function of normal load for various sliding velocities under grease lubrication in vacuum

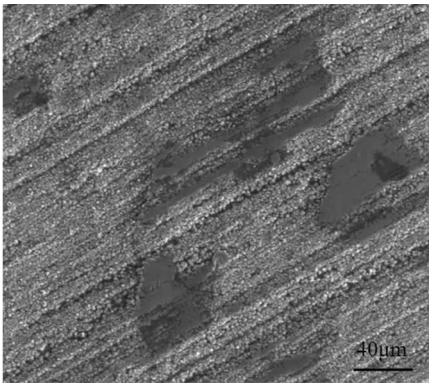
图 5 脂润滑时离子渗氮 2Cr13 钢盘在真空中不同滑动速度和载荷下磨痕宽度的变化

在真空与法向载荷为 90 N 的条件下,滑动速度的变化对脂润滑时离子渗氮 2Cr13 钢盘试样的磨损表面形貌影响很大。当滑动速度小于 0.8 m/s 时,渗氮盘试样的磨损表面除了以光滑表面为主要特征外,局部区域出现材料转移。这表明黏着磨损的发生,如图 7(a)所示。当滑动速度增至 1.2 m/s 时,除了具有材料转移特征外,磨损表面还出现了疲劳裂纹和少量的疲劳点蚀坑,如图 7(b)所示。当滑动速度增至 1.6 m/s 时,磨损表面形貌的特征较为复杂,除具有上述所有的特征[见图 7(c)]外,还呈现出局部轻度剥落,如图 7(d)。局部轻度剥落的产生是由于疲劳裂纹的扩展和桥联导致的。由上面的分析可知,当载荷为 90 N 时,随着滑动速度的增加,渗氮层的磨损机制由具有微切削和微黏着特征的轻微磨损向轻微复合磨损机制转变。在真空脂润滑条件下渗氮层发生轻微复合磨损时,磨损表面同时具有微切削、轻微黏着、轻微疲劳点蚀和局部轻度剥落特征。

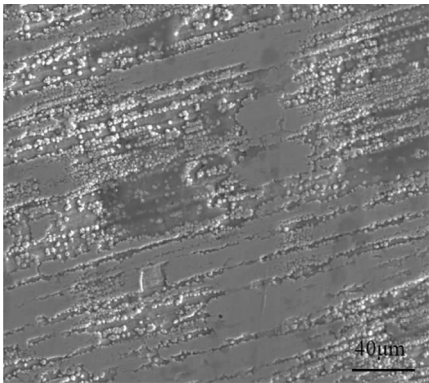
因此,可以认为,在本文所涉及的摩擦试验参数范围内,在真空中脂润滑离子渗氮 2Cr13 钢的磨损均为轻微磨损。随着载荷和滑动速度的增加,开始呈现具有微切削和轻微黏着特征的轻微磨损,然后向具有微切削、轻微黏着、轻微疲劳点蚀和局部轻度剥落特征的轻微复合磨损机制过渡。

2.3 脂润滑渗氮层的真空磨损表面 XPS 分析

通过对清洗后渗氮盘磨损表面几种典型元素的



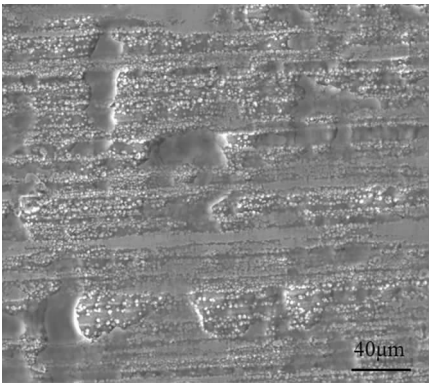
(a) 10 N, 0.2 m/s



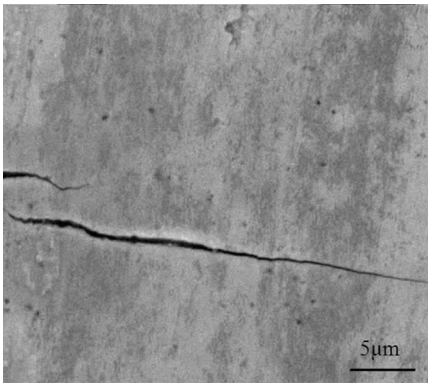
(b) 50 N, 1.6 m/s

Fig. 6 SEM micrographs showing worn surfaces of the nitrided 2Cr13 steel disks after cleaning for loads lower than 90 N under grease lubrication in vacuum

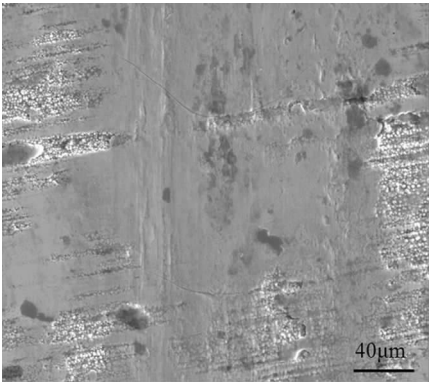
图 6 离子渗氮 2Cr13 钢盘在真空与脂润滑条件下载荷小于 90 N 时的清洗后磨损形貌



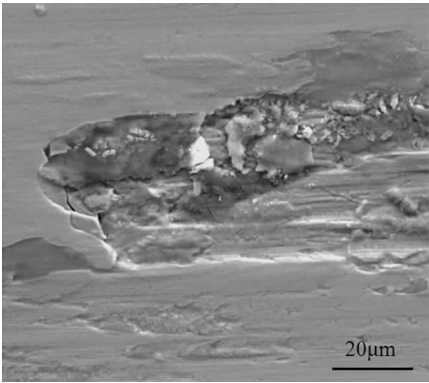
(a) 0.2 m/s



(b) 1.2 m/s



(c) 1.6 m/s



(d) 1.6 m/s

Fig. 7 SEM micrographs showing the cleaned worn surfaces of the nitrided 2Cr13 steel disks for the load 90N under grease lubrication in vacuum

图 7 脂润滑时离子渗氮 2Cr13 钢盘在真空和 90 N 载荷条件下的 SEM 磨损形貌

XPS 谱线分析表明,在低载荷(如 10 N)条件下,渗氮盘磨损表面元素的 XPS 特征峰与磨损前相同.但是,在较高载荷与滑动速度条件下,却发现渗氮盘磨损表面的 XPS 谱与磨损前各元素的特征峰相比,均出现了新的特征峰.下面重点结合在 90 N 载荷与 1.6 m/s 滑动速度条件下所进行的 XPS 分析结果,

剖析 2Cr13 钢离子渗氮层与 PFPE 润滑脂相互作用的基本特点.

图 8 示出了磨损表面的几种典型元素的 XPS 谱,包括 F1s、Fe2p_{3/2} 及 N1s 谱.由图 8(a)明显可以看出,磨损表面上氟元素的 F1s 谱线存在两个特征峰.较高结合能 689.3 eV 处的特征峰与原始油脂

的相同,对应于氟与碳(C—F)的结合能^[11-12];而在较低结合能 685.3 eV 处出现了新的特征峰.此特征峰与金属氟化物中的金属与氟之间(M—F)的结合能相吻合.由图 8(b)可知,与磨损前相比,XPS 的 Fe2p 谱线在较高结合能 714.5 eV 处出现了新的特征峰,此特征峰与铁的氟化物中的 Fe—F 之间的结合能相吻合.文献[13-14]证明该物质为 FeF₃.因此,根据以上 XPS 分析结果可知,润滑脂与渗氮盘表面在真空摩擦磨损过程中发生了化学反应,并生成 FeF₃.另外,从 N1s 谱图可见,与原始渗氮层表面

相比,磨损后代表铁的氮化物(结合能 397.9 eV 处)和铬的氮化物的特征峰(结合能 396.7 eV 处)均明显降低[如图 8(c)所示],这进一步说明在真空摩擦磨损过程中润滑脂与渗氮层(成分为金属氮化物)发生了化学反应,从而使渗氮层表面的金属氮化物明显减少.文献[15-17]已经证实,PFPE 润滑剂在低氧分压环境和边界润滑条件下,由于微凸体发生直接接触可产生高摩擦热,最终导致 FeF₃ 的形成. FeF₃ 属于路易斯酸性物质,具有催化作用,可促进 PFPE 润滑脂降解.

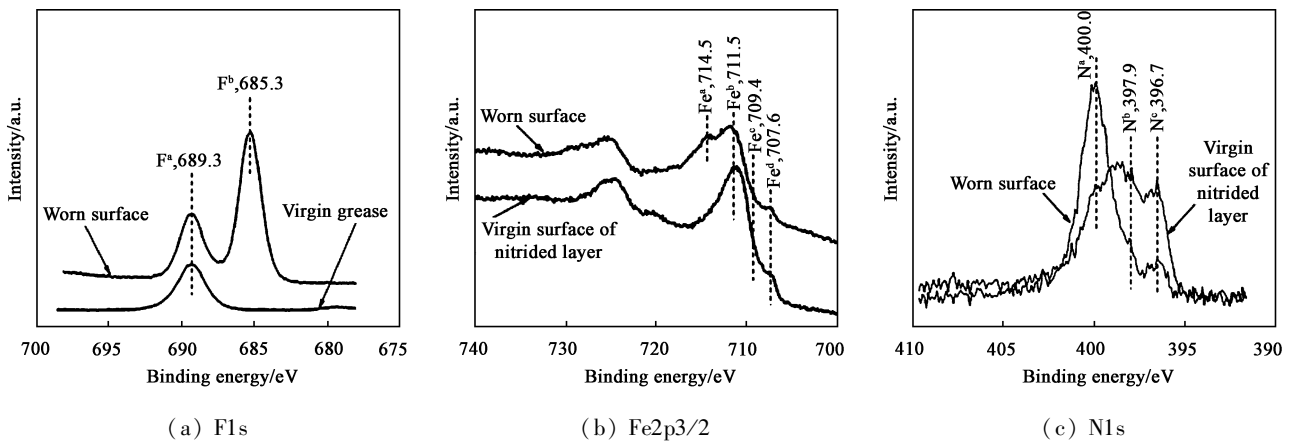


Fig. 8 XPS spectra for worn surfaces of the cleaned nitrided disks lubricated with PFPE grease after sliding in vacuum

图 8 经过清洗的脂润滑渗氮盘真空磨损表面典型元素的 XPS 谱

表 1 不同载荷与滑动速度条件下 F^b/F^a 和 Fe^a/Fe^b + Fe^c + Fe^d 的值

Table 1 The F^b/F^a and Fe^a/Fe^b + Fe^c + Fe^d value under various loads and sliding velocities

Test condition	F ^b /F ^a	Fe ^a /Fe ^b + Fe ^c + Fe ^d
10 N, 1.6 m/s	0	0
30 N, 1.6m/s	0.12	0.05
50 N, 1.6m/s	0.88	0.09
90 N, 1.6m/s	2.15	0.28
90 N, 1.2m/s	1.32	0.26
90 N, 0.2m/s	0.85	0.11

为了定性分析不同真空摩擦磨损试验条件下渗氮层与润滑脂之间化学反应的程度,分别利用 F1s 和 Fe2p_{3/2} 的 XPS 谱中 F^b 与 F^a 的面积之比,以及 Fe^a 与 Fe^b + Fe^c + Fe^d 的面积比对金属氟化物的生成量进行衡量^[9].表 3 列出了不同载荷和滑动速度条件下 F1s 中的 F^a 与 F^b 及 Fe2p 中的 Fe^a 与 Fe^b + Fe^c + Fe^d 的面积比数值.可见,F^a/F^b 及 Fe^a/Fe^b + Fe^c + Fe^d 随着载荷和滑动速度的增加而增加.在摩擦过程中,由于增大载荷和滑动速度会引起摩擦热

的增加,使得润滑脂与渗氮层之间更加容易反应,即增加载荷和滑动速度会加速润滑脂与渗氮层之间的反应,同时也会加速润滑脂的降解.因此,在高滑动速度和高载荷下,磨损表面出现了疲劳点蚀坑,如图 7(b~c)所示.

2.3 润滑脂的 FTIR 分析

为了进一步分析润滑脂在真空摩擦过程中的成份变化及润滑机理,在离子渗氮 2Cr13 钢盘磨损表面上对润滑脂取样进行 FTIR 测试分析.在低载荷 10 N 下的润滑脂摩擦后由白色变为灰色;在较高载荷(大于 10 N)下渗氮盘的磨痕边缘处的润滑脂也由白色变为灰色.对这两种条件下的灰色润滑脂进行 FTIR 分析,结果表明两种情况下灰色润滑脂的 FTIR 谱都与原始脂的基本相同,如图 9(a)所示.这说明变为灰色的润滑脂没有或者极少量发生成份的变化.

图 9(b)示出了较高载荷(大于 10 N)下经过真空摩擦后变为黑色的 PFPE 润滑脂的 FTIR 谱.由图可以看出,与原始脂(见图 2)相比,在摩擦后变成黑色的润滑脂的 FTIR 谱上出现了两个新的特征吸收

带. 其一为位于 $3\,000 \sim 3\,600\text{ cm}^{-1}$ 之间宽的吸收带, 另一个为位于 $1\,663\text{ cm}^{-1}$ 附近较窄的吸收带. 宽的吸收带归因于羟基 ($-\text{OH}$) 官能团的出现, 而位于 $1\,663\text{ cm}^{-1}$ 附近的吸收带是由于羧基中的羰基 ($\text{C}=\text{O}$) 伸缩振动产生的^[18]. 通常, 不对称羰基伸缩振动的波数区为 $1\,786 \sim 1\,660\text{ cm}^{-1}$. 吸收的羧酸一定是与氢键相联. 这一点可由位于 $3\,000 \sim 3\,600\text{ cm}^{-1}$ 之间宽的吸收带得到证实. 氢键对峰位

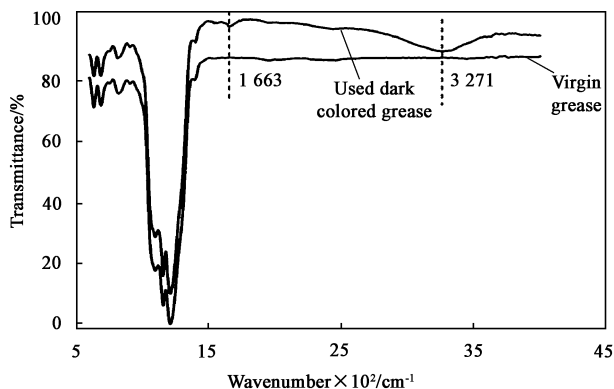


Fig. 9 FTIR spectra of grease taken from worn surfaces of the plasma-nitrided 2Cr13 steel disks

图 9 离子渗氮 2Cr13 钢盘上
变为灰色和黑色的润滑脂的 FTIR 图谱

会产生极明显影响, 使伸缩振动峰位向低波数方向移动. 因此, 位于 $1\,663\text{ cm}^{-1}$ 附近的吸收带是羧基中的羰基 ($\text{C}=\text{O}$) 所引起的. 这两种官能团是全氟聚醚润滑剂降解的典型产物^[19].

3 结论

a. 在真空摩擦磨损试验条件下, 与滑动速度相比, 法向载荷对 PFPE 脂润滑 2Cr13 钢离子渗氮层的摩擦磨损行为影响较为明显. 平均摩擦系数随法向载荷明显增加, 随滑动速度的增加则有所降低 (低载荷 10 N 时除外); 并且, 其降低幅度随法向载荷增加而增大.

b. 在试验的法向载荷与滑动速度范围内, 真空中脂润滑 2Cr13 钢离子渗氮层的磨损机制均为轻微磨损. 随着法向载荷和滑动速度的增加, 开始呈现具有微切削和轻微黏着特征的轻微磨损, 然后向具有微切削、轻微黏着、轻微疲劳点蚀和局部轻度剥落特征的轻微复合磨损机制过渡.

c. 在真空摩擦磨损过程中渗氮层与 PFPE 润滑脂之间可发生化学反应, 并有 FeF_3 生成, 促进 PFPE 润滑脂发生降解. 增加载荷和滑动速度会加速

渗氮层与润滑脂之间的反应, 进一步促进润滑脂的降解.

参考文献:

- [1] Alsaran A. Determination of tribological properties of ion-nitrided AISI 5140 steel [J]. *Materials Characterization*, 2003, 49: 171-176.
- [2] Sun Y, Bell T, Wood G. Wear behaviour of plasma-nitrided martensitic stainless steel [J]. *Wear*, 1994, 178: 131-138.
- [3] Kato H, Eyre T S, Ralph B. Wear mechanism map of nitrided steel [J]. *Acta Metallurgica et Materialia*, 1994, 42: 1 703-1 713.
- [4] Corengia P, Walther F, Ybarra G, *et al.* Friction and rolling-sliding wear of DC-pulsed plasma nitrided AISI 410 martensitic stainless steel [J]. *Wear*, 2006, 260: 479-485.
- [5] Xia Y Q. Progress of tribology of inorganic protective films on friction surface [J]. *Tribology*, 2004, 24 (6): 576-580 (in Chinese) [夏延秋. 摩擦表面无机保护膜摩擦学研究进展 [J] 摩擦学学报, 2004, 24(6): 576-580].
- [6] Ma Y S, Liu J J, Zheng L Q, *et al.* The synergistic effect between the surface treated with ion nitriding and extreme pressure-antiwear additives under boundary lubrication [J]. *Tribology*, 1994, 11(1): 33-40 (in Chinese) [马雁声, 刘家俊, 郑林庆, 等. 边界润滑条件下离子渗氮与极压抗磨添加剂的协同作用 [J]. 摩擦学学报, 1994, 11(1): 33-40].
- [7] Xia Y Q, Zhou F, Lin Y M, *et al.* Study on friction and wear properties of plasma nitriding 45 # steel under different lubrication [J]. *Tribology*, 2006, 26(2): 145-149 (in Chinese) [夏延秋, 周峰, 林一民, 等. 45#钢等离子渗氮在不同润滑剂下的摩擦磨损性能研究 [J]. 摩擦学学报, 2006, 26(2): 145-149].
- [8] Xia Y Q, Hu J H, Zhou F, *et al.* Friction and wear behavior of plasma nitrided 1Cr18Ni9Ti austenitic stainless steel under lubrication condition [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2005, 402: 135-141.
- [9] Jisheng, Gawne D T. Wear characteristics of plasma-nitrided CrMo steel under mixed and boundary lubricated conditions [J]. *Journal of Materials Science*, 1997, 32: 913-920.
- [10] Fu Y Q, Batchelor A W, Loh N L, *et al.* Effect of lubrication by mineral and synthetic oils on the sliding wear of plasma nitrided AISI 420 stainless steel [J]. *Wear*, 1998, 219: 169-176.
- [11] Moulder J F, Hammond J S, Smith K L. Using angle resolved ESCA to characterize winchester disks [J]. *Applied Surface Science*, 1986, 25: 446-454.
- [12] Herrera-Fierro P, Masuko M, Jones W R, *et al.* XPS analysis of 440C steel surfaces lubricated with perfluoropolyethers under sliding conditions in high vacuum [R]. NASA/TM-1994-106548.
- [13] Carre D J. Perfluoropolyether lubricants under conditions: iron catalysis of lubricant degradation [J]. *Journal Synthetic Lubrication*, 1989, 6(1): 3-15.

[14] Carre D J. Perfluoropolyalkylether oil degradation: inference of FeF₃ formation on steel surfaces under boundary conditions[J]. ASLE Transactions,1986,29(2) :121 – 125.

[15] Mori S, Morales W. Reaction of perfluoroalkylpolyethers (PFPE) with 440C stainless steel in vacuum under sliding conditions at room temperature[R]. NASA/TP – 1989 – 2883.

[16] Hayashida K,Yamamoto K,Nishimura M. Wear and degradation characteristics of perfluoroalkyl polyethers (PFPEs) in high vacuum[J]. Tribology Transactions,1994, 37:196 – 200.

[17] Jones W R Jr. Properties of perfluoropolyethers for space applications[J]. STLE Transactions,1995,38(3) :557 – 564.

[18] Lin – Vien D, Colthup N, Fateley W J, *et al.* The handbook of infrared and Raman characteristic frequencies of organic molecules[M]. New York:Academic Press,1991.

[19] Novotny,Pan V J X, Bhatia C S. Tribochemistry at lubricated interfaces[J]. Journal of Vacuum Science and Technology A, 1994,12;2 879 – 2 886.

投 稿 指 南

《摩擦学学报》是《中国科学引文数据库》首批收录的期刊之一,已列入中国科学院文献评价中心《中国科学引文数据库统计源期刊》、科技部中国科学技术信息研究所《中国科技论文统计源期刊》和《中文核心期刊要目总览》,已被美国《工程索引(EI)》、《化学文摘(CA)》、《剑桥科学文摘(CSA)》以及日本《科学技术文献速报》等多种检索系统收录;已入编《中国学术期刊(光盘版)》,作者著作权费和稿酬一次性给付,如投稿人不同意将文章编入光盘版中,请在投稿时声明,本刊将进行适当处理.

1 栏目与篇幅要求

- 研究论文:报道具有学术价值的研究成果,全文在 7 000 字左右;
- 研究简报:报道最新的研究成果与进展,全文在 5 000 字左右;
- 工程应用:报道摩擦学研究领域的工程与应用进展,全文在 7 000 字左右;
- 专家论坛:报道国内外摩擦学界专家对摩擦学研究领域的最新进展与研究方向的论坛,全文在 9 000 字左右;
- 评述与进展:反映国内外摩擦学研究领域的最新进展与研究方向,全文在 9 000 字左右;
- 以上 5 个栏目的文章所限字数均包括图、表及参考文献,请注意文责由作者自负,请勿一稿多投.

2 稿件质量要求

- (1)题名应简练,一般不超过 20 个字,题名中尽量不用缩略语、符号和分子式,稿件中必须具有约 200 字的中文摘要和详细的英文摘要,并请分别列出 3 ~ 8 个关键词和文章所属的中图分类号;
- (2)稿件全文按照 1.5 倍行距通栏排版;
- (3)稿件中的插图、表格和照片尽量精选(插图不得超出 8 幅),曲线图全部采用黑色线条,且应匀滑易辨,图上字符数码必须工整到位,表格一律采用 3 线表,图题、图注、表题及表中内容均应附有中、英文 2 种文字说明;
- (4)稿件中的计量单位及符号的使用请参照我国法定计量单位及有关国家标准;
- (5)参考文献应选择作者亲自阅读过的和最主要的,并按文中引用先后顺序编号(1 篇文章最好不超过 50 条),非正式出版物和尚未发表的论文不得引用,著录格式请参照 GBT 7714 – 2005,且每条中文参考文献均需提供相应英文翻译.

3 投稿方式

本刊现采取网上投稿的方式处理稿件,投稿平台网址为:www. tribology. com. cn,请在作者登陆一栏中点击新用户注册,注册完成后即可在网上投递论文. 投稿时请填写作者联系邮箱,以便及时接受编辑部的邮件. 请国内的作者在网上投稿时附上中文标题和摘要.

本刊不收取审稿费.

4 稿件处理

- (1)投稿一经受理即发收稿回执,否则将退请作者补充或退稿;
- (2)稿件的处理情况一般在收稿后 3 个月内告知作者,需要修改的稿件将由编辑部整理改稿意见并通知作者,作者返回修改稿时应附有对改稿意见的逐条处理说明;作者可通过网站随时查询稿件的处理状态;
- (3)编辑有权对稿件作必要的文字修改,作者在收到编辑加工的清样后务请仔细校核(仅可适当作个别改动),并尽快返回编辑部. 请作者按版面支付发表费;
- (4)来稿一经发表,即按规定寄付稿酬并赠送当期刊物.