

## 机械零件摩擦磨损表面自修复研究进展\*

刘 谦, 许 一, 史佩京, 于鹤龙, 徐滨士

(装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京, 100072)

**摘 要:** 摩擦学的发展已将摩擦磨损的研究从抗磨减摩扩展到磨损表面的自修复甚至是零磨损。文中对摩擦磨损表面自修复的概念进行了阐述, 详细论述了自发摩擦磨损自修复和条件摩擦磨损自修复的几种类型和实现模式, 指出纳米技术的发展有望在摩擦表面建立起一层自组装的、坚固的、自修复的润滑膜, 为摩擦磨损表面自修复提供了切实的途径。

**关键词:** 表面工程; 自修复; 摩擦磨损; 纳米材料; 添加剂

中图分类号: TH117.3

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2005)05-0001-04

### The Research Progress of Friction and Wear Surface Self-repairing of Machine Parts

LIU Qian, Xu Yi, SHI Pei-jing, YU He-long, XU Bin-shi

(National Key Laboratory for Remanufacturing, Beijing 100072)

**Abstract:** The development of tribology has shown a new direction, that is, the research on self-repairing of wear surface besides the traditional researches of friction and wear. In this paper, the concept of friction and wear surface self-repairing was described. It indicated that a self-assembled strong self-repairing lubricating film can be formed on the friction surface by means of nanotechnology.

**Key words:** surface engineering; self-repairing; friction and wear; nano-materials; additives

## 0 引 言

规则结构缺陷的自修复概念在生物学领域中已经非常熟悉, 尤其是DNA研究中, DNA链的缺陷通过重构工艺得到修复<sup>[1]</sup>。分子尺寸可以达到纳米或几十纳米的大分子如超分子化合物、富勒烯等这一类大分子化合物, 当分子结构达到一定尺寸和复杂程度时, 会出现自修复、自组合等特殊性质<sup>[2]</sup>。我国南京航空航天大学开展了利用空芯光纤自诊断、自修复的智能结构研究<sup>[3]</sup>, 中科院的赵晓鹏等提出了具有自修复行为的智能材料模型, 并制作了具有自修复功能的智能材料样品<sup>[4]</sup>。日本学者研究了具有自组装、自修复特点的机械系统和利用环氧粒子进行自修复的智能材料系统<sup>[5,6]</sup>。日本学者还利用具有自补偿性能的阳极多孔氧化铝进行纳米级有序图案的自修复研究<sup>[1]</sup>。美国研究了对低速冲击

具有自修复能力的树脂复合材料<sup>[7]</sup>。美国的国家纳米技术计划(NNI)中将设计和制造能进行自修复的纳米材料作为可能取得突破的长期目标。我国的研究工作者提出了摩擦磨损表面自适应、自修复的设想, 将摩擦磨损的研究从抗磨减摩扩展到磨损表面的自修复甚至是零磨损。纳米材料的发展为这一目标的实现提供了新的途径<sup>[8,9]</sup>。由于纳米材料具有比表面积大、高扩散性、易烧结性、熔点降低等特性, 因此以纳米材料为基础制备的新型润滑材料应用于摩擦系统中, 将以不同于传统载荷添加剂的作用方式起到减摩抗磨作用。这种新型润滑材料不仅可以在摩擦表面形成一层易剪切的薄膜, 降低摩擦因数, 而且直接吸附到零件的划痕或微坑处, 或通过摩擦化学反应产物对摩擦表面进行一定程度的填补和修复, 起到自修复作用<sup>[10]</sup>。

## 1 摩擦磨损表面自修复的概念

磨损是机械零件失效的3大原因(磨损、腐蚀和断裂)之一。从作用过程看, 磨损和摩擦是同时发生

收稿日期: 2005-07-08; 修回日期: 2005-09-12

基金项目: \*国家自然科学基金重点项目(50235030)军队“十五”预研项目(项目略)

作者简介: 刘谦(1973-), 男(汉), 河北辛集人, 助研, 博士生。

的,并且相互影响。二者尽管不是材料的固有属性,但它们与材料的本性有关,又与摩擦学系统有关。机械部件在同一摩擦过程中,摩擦磨损与摩擦修复往往同时存在,两者不平衡时表现为磨损或负磨损,平衡时则表现为“零磨损”,而极不平衡时则表现为熔焊或胶合。

机械零件的磨损一般起始于早期的轻度磨损,摩擦磨损的自适应、自修复是材料学和摩擦学设计的最终目标,这既是对提高性能的要求,又是仿生化和环境友好化的要求。为减少或消除磨损,除进行合理的摩擦学设计外,可通过 3 条途径来实现:一是减少或控制造成磨损的条件,如腐蚀、疲劳、浸蚀、粘着转移磨粒磨损等,如利用各种功能的润滑添加剂;二是提高摩擦副的耐磨性能,如表面合金化、渗硫、渗硼等;三是使材料具有自组织、自修复的能力或磨损过程中通过形成新的补偿层来弥补磨损<sup>[11]</sup>。目前进行的工作大多集中在前两条途径上,使摩擦表面达到少磨损、零磨损,而第三条途径能够实现摩擦磨损表面的自修复,通过自修复补偿摩擦表面的磨损或其他损伤,甚至是使磨损部位恢复到零件设计尺寸。

摩擦磨损表面自修复是指在摩擦过程中,摩擦表面的磨损或划伤等表面损伤实现自组织、自适应或自修复,恢复并保持甚至提高摩擦表面的摩擦学性能,因而保持或恢复摩擦副的设计性能。摩擦磨损自修复按照实现条件可以分为自发自修复和条件自修复。

## 2 自发生摩擦磨损自修复

摩擦磨损中由于热、力、电、化学及材料等的非线性、不可逆交互作用,出现了一些自发形成的,在摩擦过程中会随着工作条件变化而调整的,摩擦因数和磨损率极低的表面自修复结构,呈现出一定条件、一定程度的自组织、自适应、自修复作用<sup>[11]</sup>。摩擦过程中,磨损的产生和修复作用的实现均是在摩擦系统中自然发生的,因此称之为自发生摩擦磨损自修复。

### 2.1 摩擦表面氧化膜自修复

早在 1907 年 Archbatt 等人就指出,在许多被认为是金属表面间的摩擦,实际上并不是纯金属间的摩擦,而是在两表面间存在的化学膜的摩擦,如氧化膜、硫化物膜,在一般压力条件下它们能防止金

属与金属的粘着,降低摩擦与磨损<sup>[12]</sup>。Waterhouse 对钛合金 IMI829 在 20、400、500 和 600 大气环境下进行微动磨损(Fretting)实验,发现随着温度升高,摩擦因数和磨损量都呈下降趋势,产生这一结果的原因是在合金表面生成了一层厚度为 10  $\mu\text{m}$  的  $\text{TiO}_2$  氧化层。在较高温度下,化学反应易于获得足够的活化能和较高的反应速度,而且氧化膜在较高温度下表现为玻璃态,这时它更像液体,因而摩擦和磨损量会随着温度升高而下降。由于生成的氧化物、硫化物在摩擦过程中不断磨损消耗,又很快自行修复,有时摩擦因数和磨损量还会下降,甚至出现零磨损,且在某些情况下,摩擦条件越苛刻,氧化的速度、范围会随之不断增加,因此它具有一定的自适应性。

### 2.2 摩擦表面熔融自修复

在摩擦过程中当摩擦副处于一种非平衡、不可逆的摩擦状态时,如两粗糙表面产生相对运动时,在摩擦产生的力、电、热等作用下材料就会通过其自身的塑性变形、釉化、跑合甚至相变(如熔融)来产生与摩擦环境相适应的自适应机制<sup>[11]</sup>。要想获得较小摩擦因数的方法之一是在硬固体上有一层易剪切的软物质,这是摩擦学设计的主要根据。软物质可以是固态、液态也可以是气态。从抗剪强度看:固态>液态>气态,这样可以得到摩擦因数显著不同的 3 种润滑:边界润滑、流体润滑和气悬浮润滑(如磁悬浮轴承、列车等)。滑雪时冰与滑雪板摩擦,摩擦热的一部分使冰熔化为水,水的粘度很小,剪切强度低使摩擦因数降低,减少了摩擦热的产生,这是具有可逆性和自适应性的自修复过程。

### 2.3 摩擦副选择性转移自修复

选择性转移是一种具有自修复功能的摩擦现象。铜合金/钢摩擦副在甘油中进行边界摩擦时,铜离子从铜合金中析出转移到钢表面,又从钢表面上反转移到铜合金表面上,其摩擦因数降至流体摩擦,而磨损极微,甚至产生负磨损,这种特殊现象称为选择性转移<sup>[13]</sup>。

前苏联提出了选择性转移机理,分为 4 种形式,即钢-铜摩擦副在甘油等介质作用下形成了等离子体润滑、镀金属润滑、横贯润滑和离子润滑<sup>[14]</sup>。选择性转移形成的过程为钢-铜摩擦副表面微凸体在某些介质及载荷作用下发生选择性溶解和形成塑性表面膜,因而减低了压强,除基体材料的变形外,

还有表面膜变形的扩散-空位机理，因此易于发生滑移并能减少磨损；由于润滑介质具有还原性，能防止摩擦表面的氧化，由于双层电场能吸引弥散的金属微粒，使之沉积在接触区内，因而能大大减少被润滑油带走的金属微粒。最终结果是铜元素转移到钢表面形成一层修复性保护膜，减少摩擦和磨损。

### 3 条件摩擦磨损自修复

条件摩擦磨损自修复是在特定的摩擦系统条件下，如适当的摩擦配副材料、润滑介质和一定的工况条件，通过润滑介质及环境的物理化学作用，在摩擦副表面形成吸附修复层、物理沉积修复层、化学转化膜修复层，或使摩擦副表面改性来实现的一种自修复<sup>[9]</sup>。摩擦是实现自修复的内部条件，添加剂和适当的工况条件是实现自修复的外加条件。条件自修复包括表面成膜自修复、在线强化自修复和摩擦条件优化自修复。从自修复的效果来看，表面成膜自修复不仅能够实现摩擦副系统性能的恢复（如发动机的功率、缸压），还能使摩擦副表面尺寸得到恢复，而后两者只能达到提高摩擦副性能，是实现在线的强化、优化自修复，而表面成膜自修复是真正意义上的自修复。

#### 3.1 表面成膜自修复

摩擦过程中，利用摩擦产生的机械摩擦作用、摩擦化学作用和摩擦-电化学作用，摩擦副与润滑材料产生能量交换和物质交换，从而在摩擦表面上形成正机械梯度的金属保护膜、金属氧化物保护膜、有机聚合物膜、物理或化学吸附膜等，以补偿摩擦副的磨损与腐蚀，形成磨损自修复效应。该修复膜的形成与磨损在摩擦磨损过程中往往是同时存在的，是一个动态的磨损和修复过程。

表面成膜自修复的作用机理与传统活性添加剂在摩擦表面形成的润滑膜不同，不是以牺牲表面物质为条件，而是在摩擦条件下在作用表面上沉积、结晶、铺展成膜，使磨损得到一定补偿并有一定抗磨减摩作用。目前关于表面自修复膜的修复机理大致分为几类<sup>[11,15,16]</sup>：第一是沉积成膜自修复，即分散在油品中的固体微粒沉积在摩擦副表面，形成一层具有抗磨减摩作用的保护膜；第二是铺展成膜理论，即润滑介质中的添加剂分子与活化的金属表面发生物理化学作用形成化学吸附膜或极性添

加剂分子直接吸附在摩擦副表面形成物理吸附膜，从而起到抗磨减摩作用；第三是共晶成膜理论，即在边界润滑条件下局部的摩擦高温促使添加剂微粒与磨损微粒化合成微小的共晶微球，在表面形成具有滚动性润滑功能的保护层膜，可以填充摩擦表面凹处，改善摩擦表面的密封性能并降低摩擦阻力延长机具寿命。一些金属或金属合金类纳米材料可以在某种程度上体现这一理论的作用机理。在一定温度、压力、摩擦力作用下，表面产生剧烈摩擦和塑性变形，纳米材料在摩擦表面沉积并与塑性表面作用，当摩擦表面的温度高到一定值，纳米粒子强度下降与金属表面摩擦的微观颗粒产生共晶，填补表面微观沟谷，从而形成一层修复膜。另外基于自发的选择性转移自修复机理，通过研究具有选择性转移效应的润滑添加剂，进一步促进选择性转移的发生，如使铜摩擦副表面发生选择性溶解，在其对偶钢表面形成以Al、Cu为主的磨损补偿膜，修复钢摩擦副表面的磨损；同时使钢表面或磨粒中的Fe元素在其对偶铜表面发生摩擦化学沉积，形成铝、铜和铁组成的自修复复合膜。这种保护膜有高的点缺陷或高空位密度，而没有疲劳过程中所固有的缺陷积累。

#### 3.2 在线强化自修复

在线强化在生物领域有许多成功的实例，例如人的手掌、脚掌等受摩擦较多的部位表面会形成较硬的耐磨性老茧。在摩擦学领域，通过采用特种添加剂与金属摩擦副产生机械物理作用和物理化学作用，从而在摩擦副纳米级或微米级厚度层内渗入、或诱发产生新元素或新物质，使金属的微组织、微结构得到改善，从而改善金属的强度、硬度、塑性等，实现摩擦副的在线强化，提高摩擦副的承载能力和抗磨性能。由于生成的是一种非活性材料，所以避免了传统润滑添加剂在提高油品极压性能的同时对抗磨性能、抗氧化性能等的负面影响。

通过原位摩擦化学处理的方式可以实现在线强化自修复。原位摩擦化学处理是在研究硼型抗磨剂的作用机理时逐步发展起来的。开始先发现B、N、C等非金属元素在摩擦过程中能在表面形成渗透层，并发现了稀土在摩擦过程中的扩散作用及催渗作用，继而发现了金属元素的摩擦渗镀作用，这些作用类似于金属零件表面的化学热处理，由于它是在零件运转的摩擦过程中发生的，故称之为“原位

摩擦化学处理”，实际上是一种摩擦副表面在润滑添加剂的影响下对摩擦磨损的自适应<sup>[11]</sup>。

### 3.3 摩擦条件优化自修复

摩擦条件如润滑介质、表面粗糙度等直接影响到摩擦副的摩擦磨损性能。通过摩擦条件优化可以使摩擦磨损性能得到恢复和提高，实现摩擦性能的自修复。摩擦条件优化包括摩擦表面的优化和润滑剂性能的优化<sup>[17]</sup>。

摩擦过程中由于磨损会使摩擦表面粗糙度增大，使摩擦条件进一步恶化。抛光后的摩擦表面，不但摩擦因数会更低，且承载时接触面的压应力会更小，因而可相应的提高油品的承载能力，改善润滑条件。例如把分布很窄的纳米粒子添加到润滑油中作磨光材料本身就是一种精密抛光方法，可加工表面粗糙度为 0.1 ~ 1.0 nm RMS 的超光滑表面<sup>[18]</sup>。对苛刻摩擦条件下的粗糙表面，磨损可迅速发生，但对粗糙度较小的光滑表面，由于压应力小，如果不是摩擦学条件特别苛刻，磨损也是十分缓慢的。通过表面的机械抛光等作用改善摩擦副表面平整性，降低表面粗糙度，对提高摩擦副的抗磨减摩性能是有利的。

任何润滑油都具有一定的粘压特性，当位于摩擦副之间的油膜承受载荷压力作用时其粘度增大，油膜会被稠化，甚至变为具有相当触变强度的类固体膜。当润滑油膜中弥散分布有聚合物锚固的无机纳米粒子时，纳米粒子在油膜中的弥散分布将使：

油膜粘度增大、厚度增加，触变强度上升：粒子表面锚固的聚合物使油膜的韧性和强度增加<sup>[19]</sup>。以上两因素均有利于改善油品的抗磨减摩性能和承载能力，而且能够提高气密性，最终提高机械系统的性能。

通过摩擦条件的优化达到最佳的摩擦磨损状态，最终表现为整个摩擦副甚至是摩擦系统摩擦磨损性能的恢复，而不是摩擦副表面磨损的修复，因此此类自修复也可以称之为“摩擦系统自修复”。该自修复作用导致摩擦副达到低的摩擦因数、小的磨损量，更重要的是实现摩擦副应用系统整体性能的最优化，如通过发动机活塞和活塞环摩擦副摩擦条件优化，能够提高发动机的汽缸压力和有效功率，恢复发动机的使用性能。这种自修复是动态的自修复，在摩擦系统运行过程中实时完成，其自修复的效果以系统的功能为评价依据，容易由于工况条件

等外界因素的改变失去自修复作用或受其他因素影响而体现不出自修复作用效果。

## 4 结 语

近年来，随着纳米科学技术的发展，相继诞生了微观摩擦学和纳米摩擦学 ( Nanotribology )，以零磨损、超滑为目标的纳米颗粒材料、表面改性技术、表面分子工程取得进展。通过研究纳米粒子的微观摩擦磨损行为和材料表面的物理化学状态变化，有望在摩擦表面建立起一层自组装的、坚固的、自修复的润滑膜，为零磨损和原位动态自修复的实现提供一条切实的途径。

### 参考文献：

- [1] Hideki Masuda, Masato Yotsuya, Mari Asano, et al. Self-repair of ordered pattern of nanometer dimensions based on self- compensation properties of anodic porous alumina [J]. Applied Physics Letters, 2001,78 (6):826-828.
- [2] 薛群基,徐康. 纳米化学 [J]. 化学进展,2000,14 (4): 431-444.
- [3] Yang Hong, Tao Baoqi, Qiu Hao, et al. Research on self-diagnose and self-repair using hollow-center optical fiber in smart structure, In optical measurement and nondestructive testing: techniques and applications [C]. Proceedings of SPIE, 2000,4221:264-268.
- [4] 赵晓鹏,周本濂,罗春荣,等. 具有自修复行为的智能材料模型 [J]. 材料研究学报, 1996,10(2): 101-104.
- [5] Satoshi Murata, Eiichi Yoshida, Haruhisa Kurokawa, et al. Self-repairing mechanical system [C]. Part of the SPIE conference on sensor fusion and decentralized control in robotic systems II, Boston, September 1999: 202-213.
- [6] Zako M, Takano N, Fujioka H. Intelligent materials system using epoxy particles for self-repair [C]. Proceedings of the eighth Japan-US. Conference on composite materials, inner harbor Baltimore, Maryland, September 1998:841-849.
- [7] Motuku M, Vaidya U K, Janowski G M. Parametric studies on self-repairing approaches for resin infused

(下转第 11 页)

- composites subjected to low velocity impact [J]. Smart Mater. Struct. 1999 8:623-628.
- [8] 徐滨士, 张伟, 刘世参, 等. 现代装备智能自修复技术 [J]. 中国表面工程, 2004, 17(1):1-4.
- [9] 徐滨士, 梁秀兵, 马世宁, 等. 实用纳米表面技术 [J]. 中国表面工程, 2001, 14(3):13-17.
- [10] 徐滨士, 马世宁, 朱胜等. 军用纳米表面工程 [C]. 总装科技委 2002 年年会论文集: 182-188.
- [11] 欧忠文, 徐滨士, 马世宁, 等. 磨损部件自修复原理与纳米润滑材料的自修复设计构思 [J]. 表面技术, 2001, 30(6):47-53.
- [12] 王汝霖. 润滑剂摩擦化学 [M]. 北京: 中国石化出版社, 1994
- [13] 郭志光, 顾丽卡, 赵源. 纳米润滑技术的进展 [J]. 新材料产业, 2003, 4:67-70
- [14] 莫易敏. 磨损自补偿理论研究及其在重载丝杆螺母上的应用 [D]. 机械科学研究院博士论文, 1995:2-3.
- [15] 姜秉新, 陈波水, 董浚修. 铜型添加剂摩擦修复作用的可行性研究 [J]. 机械科学与技术, 1999, 18(3): 445-447.
- [16] 刘维民. 纳米颗粒及其在润滑油脂中的应用 [J]. 摩擦学学报, 2003 (23) 4:265-267.
- [17] 徐滨士. 纳米表面工程 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [18] 徐滨士, 欧忠文, 马世宁. 纳米表面工程基本问题及其进展 [J]. 中国表面工程, 2001, 14(3):6-12.
- [19] 向庆华, 欧忠文, 丁培道, 等. 基于油润滑条件下的纳米单元表面优化作用机理 [J]. 重庆大学学报, 2003, (26):7.

---

作者地址: 北京丰台区长辛店杜家坎 21 号 100072

装备再制造技术国防科技重点实验室

Tel: (010) 66718874 E-mail: llttqq@sina.com