

金属磨损自修复技术的发展及应用

段宏瑜^{1,2}, 李如琰¹, 袁兆静¹

(1. 上海市轴承技术研究所, 上海 201801; 2. 上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200072)

摘要:概述了金属磨损自修复技术在国内外的应用以及在工业领域中的应用, 并指出该技术的应用仍存在许多问题需要解决。对 ART 的形成机理进行分析, 该技术的核心是利用金属摩擦表面的力化学反应条件, 将特殊组分的微纳米粉体材料转移到金属表面, 并将其改性为类金属陶瓷保护层, ART 技术是一种全新的金属摩擦磨损表面改性技术。

关键词:金属; 摩擦磨损; 自修复技术; 表面工程

中图分类号:TH117.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-2257(2016)09-0027-04

Development and Application of the Auto-restoration Technology of Wear of Metals

DUAN Hongyu^{1,2}, LI Ruyan¹, YUAN Zhaojing¹

(1. Shanghai Bearing Technology Research Institute, Shanghai 201801, China;

2. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: This paper describes the development and application of an auto-restoration technology of wear of metals, introduces its application in some important areas of the industry and then indicates the solution to the problems about this technology. The mechanism of the auto-restoration technology has been analyzed. The technology which utilizes mechanochemical reaction of worn surface of metals should transform micro-nano powder material into metallic ceramic coatings. The metallic auto-restoration materials is a novel surface engineering technique.

Key words: metals; friction and wear; auto-restoration technology; surface engineering

0 引言

磨损是材料 3 种失效模式(磨损、腐蚀和断裂)之一。根据报道, 大部分设备的损坏及失效有 80% 是由于摩擦、磨损造成的。摩擦和磨损能够严重地影响机械设备的可靠性、安全性及寿命。根据近 20 年美国、英国、日本、德国 4 个国家的调查分析指出, 由于磨损失效而造成的经济损失是非常巨大的, 是各国国民经济总产值的 2%。目前, 世界上解决构件的磨损失效问题主要采用抗磨技术、减摩技术和修复技术 3 种途径。3 种传统的解决摩擦磨损的技

术途径大多数是各自独立的, 而且其有效性、可靠性和通用性也受到限制。因此, 世界各国都在竞相竭力寻找能够同时具备减摩、抗磨和修复功能的金属磨损自修复材料和技术。金属磨损自修复技术 (ART) 是集抗磨、减摩和动态自修复功能于一体的新的表面工程技术和产品。ART 材料的主要成份是以 $Mg_6Si_4O_{10}(OH)_8$ 、 Al_2O_3 、 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 等多种矿物成份粉粒、添加剂和催化剂等组成。实际上, $Mg_6Si_4O_{10}(OH)_8$ (羟基硅酸盐) 是在大自然中由于超碱性岩层水合作用和上亿年的硅酸岩化作用而生成的硅酸岩石层状晶体, 在其形

收稿日期: 2016-05-30

作者简介: 段宏瑜 (1982—), 男, 山西晋中人, 工程师, 博士研究生, 主要从事轴承材料及加工工艺研究; 李如琰 (1964—), 女, 河南洛阳人, 高级工程师, 主要从事轴承材料及加工工艺研究; 袁兆静 (1983—), 女, 辽宁鞍山人, 工程师, 主要从事高温材料热处理研究, 通信作者。

成过程中发生了硅酸盐类,如镁原子置换铁原子的反应。ART技术的核心是利用金属摩擦表面的力化学反应条件,将特殊组分的微纳米粉体材料转移到金属表面,并将其改性为类金属陶瓷改性层(也称保护层)。使金属-金属的摩擦,转变为耐磨保护层-耐磨保护层的摩擦,对已经发生磨损的表面进行动态选择性的修复。

1 金属磨损自修复技术的发展

1.1 金属磨损自修复的形成机理

金属磨损自修复包括原位摩擦化学自修复、摩擦成膜自修复和摩擦自适应修复。其中,原位摩擦化学自修复技术的发展,最初是在研究硼型抗磨剂的作用机理时而逐步发展起来的。该技术的本质是利用物理化学和机械物理作用使添加剂在摩擦副表面渗入新元素,渗入的厚度为微米级或纳米级。通过采用这种方法可以改善金属的组织,实现在线强化,提高金属的强度和硬度^[1-2]。ART技术属于原位摩擦化学自修复的一种。当设备正在运转过程中,在摩擦副表面添加带有ART粉体的润滑油或润滑脂。当在摩擦过程中发生磨损区域后,在摩擦切削力和微粒研磨剪切力的共同作用下,就会在磨损区域发生微局部高温,此时在摩擦副表面就会发生力化学和热化学置换反应,最终生成一种类金属陶瓷层。在摩擦过程中产生的热能可以使类金属陶瓷层持续生长,直到恢复到最佳配合间隙为止。图1为ART形成机理示意图。图1a中红色圆圈区域是自修复易发生区域,该区域界面凹凸不平,在摩擦的状态下极易产生闪温现象,促使ART保护层形成。图1b为形成ART保护层后的界面形貌示意图,从图中可以发现,保护层在摩擦界面的凹坑处形成,填补摩擦副的缺陷,从而使摩擦副可以正常运行。

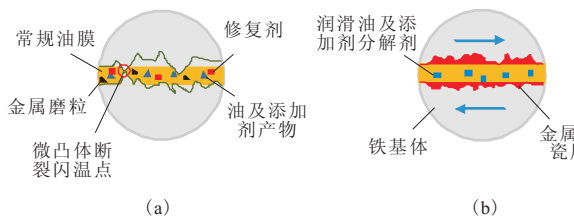


图1 ART形成机理

摩擦成膜自修复包括铺展成膜自修复、共晶成膜自修复、沉积成膜自修复和选择性转移。其形成原理是通过摩擦产生的各种形式的摩擦作用,使摩擦表面形成保护膜,用来补偿摩擦副磨损,最终形成磨损自修复效应。摩擦自适应的形成是自发的,

不可逆的。在工况变化的条件下,摩擦也跟着调整。当摩擦系数和磨损率很低时,表面自修复结构就会呈现出一定条件、一定程度的自修复作用^[3]。从理论上讲,金属磨损自修复技术可适用于任何机械设备的摩擦副和承受表面磨损、腐蚀的零部件。该技术对改善传统工程机械和零部件的使用性能及延长其使用寿命产生显著效果。如机械制造、交通运输、冶金矿石、水泥建材和电力机械等所有工业部门中,经受摩擦和磨损的机械和零部件均适用于金属磨损自修复。此外,由于金属磨损自修复技术的特殊性,对航空、航天和国防工业中一些特种机械设备,以及医疗机械、微型计算机等技术装备的高精度性能特殊需求起到良好的作用。

1.2 金属磨损自修复研究进展

早期俄罗斯的伊戈尔在钻某种岩石时,偶然发现钻头不仅没有磨损,反而在其表面生成一层陶瓷涂层使表面硬度提高^[4]。在1907年,Archbatt等人就指出金属表面的摩擦实际上并不是金属间的摩擦,而是存在两表面的化学膜之间的摩擦,如硫化膜、氧化膜,在一般压力条件下化学膜能够防止金属与金属的粘着,从而降低摩擦与磨损^[5]。近20年来,自修复技术研究开始逐步受到国际上的高度重视和关注。其中GE公司、NASA、麦道航空公司以及美国军方都曾投资立项对该方面进行研究,发现以金属修复剂一类的添加剂的功能和效果最好,同时可以实现金属的减摩、抗磨和修复。1997年,美国提出的展望2010年新一代制造计划中将自修复和自维护技术列为研究重点之一^[6]。2002年美国国家航空航天局提出开发生物有机体损伤愈合原理的生物机敏材料,以此革新和发展新一代航空、空间材料,而具有自修复性能材料的研究是这次计划的研究重点^[7]。国外的研究工作主要是围绕自修复材料和自修复控制系统方面来进行开展。如在研究智能自修复材料时发现,有一类聚合物复合材料能够感知环境和自身变化,对材料腐蚀、劣化有自修复特性。日本则将汽车的自修复材料列为本国未来十年的研究重点,实现汽车不同部位材料都具有自修复功能。我国研究者也根据生物体损伤愈合原理初步对自修复材料进行研究,利用形状记忆合金和液芯光纤对复合材料结构中的损伤进行自诊断、自修复^[8]。

徐滨士等人^[3]第一次提出金属磨损摩擦自修复原理,即摩擦自适应修复,摩擦成膜自修复,原位摩

擦化学自修复。分别研究不同条件、不同接触形式下软金属纳米铜和纳米锌自修复添加剂的摩擦学性能。90年代初,夏延秋等人^[9]在进行抗磨损性能试验时发现,将微量铜粉、镍粉和铋粉添加到石蜡基础油中,具有优异的抗磨性能。刘维民和王立光等人^[10-11]研究发现,沉积在摩擦副上的纳米级或微米级氢氧化物及氧化物对摩擦学性能起优异的作用。2002年,乔玉林等人^[12]提出摩擦表面微损伤的原位动态自修复,并把纳米材料引入到了自修复中。2004年,张津等人^[13]提出可以采用2种方法来提高摩擦副的使用寿命,一是通过表面强化来提高金属摩擦副表面强度、增加耐磨性;二是添加润滑油或通过润滑油改性等方式降低摩擦系数来提高使用寿命。董凌等人^[14]提出硬修复和软修复,即纳米微粒在摩擦条件下被还原为微晶单质,与磨损的微粒在磨损表面形成合金,硬修复层起到自修复作用。刘谦等人^[15]提出了摩擦系统自修复,包括摩擦条件优化自修复和在线强化自修复(原位摩擦化学自修复),并指出表面成膜自修复是真正意义上的自修复。2005年,杨鹤等人^[16]通过试验的方法,验证了主要组分为 $\text{Mg}_6\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ 的金属磨损自修复剂在45#钢摩擦副表面有形成修复保护层的能力。研究表明, $\text{Mg}_6\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ 在润滑过程中具有准周期性衰减振荡函数的特点,且反应层的显微硬度与45#钢相比提高1倍。同样,王磊等人^[17]以羟基硅酸镁为自修复剂,在不同工况条件下对金属磨损自修复层的形成进行分析,在摩擦条件适当时,试样盘表面会形成一层平整光滑的保护层,且修复层不会随磨损时间的增加而脱落或造成磨损加剧,并指出在水介质中金属磨损自修复剂难以形成保护层。陈国需等人^[18]以锌超细粉体作为修复剂,利用摩擦磨损试验机对已磨损的金属表面进行在线自修复试验。研究表明,所制备的修复剂对磨损表面具有明显的修复作用,形成了修复层,并指出金属摩擦副的材质和工作条件的不同,对修复剂以及在线修复工艺等有着不同的要求。近年来,金属磨损自修复技术在轴承和汽车发动机的维修中得到广泛的应用^[19-21]。李华伟^[20]将金属磨损自修复技术应用在滚动轴承上,以6310轴承样本进行对比试验,发现金属磨损自修复技术能够修复轴承滚道的磨损,提高轴承的寿命。此外,金属磨损自修复技术在对汽车发动机磨损问题进行处理时,不需要拆卸发动机,能够在短时间内使汽车发动机

磨损部位的机械零件恢复到正常尺寸状态,对延长相关零部件乃至整个发动机使用寿命,提高其可靠性水平意义重大^[21]。

2 金属磨损自修复在工业领域中的应用及存在的问题

2.1 金属磨损自修复在工业领域中的应用

近年来,金属磨损自修复技术在铁路内燃机车、载重电动轮车、汽车内燃发动机、汽车机械变速箱、汽车后桥、齿轮箱减速器、滚动轴承和压缩机等方面均得到了广泛的应用,并且在交通运输和冶金矿山等部门和行业的使用中也获得显著效果。此外,金属自修复在纺织配件、刀具、工具和机械零配件等也有一些应用。

2.1.1 轴承自修复

以轴承行业为例,我国生产的轴承精度虽然已达到国际同类产品水平,但是由于受到钢材本身的质量和热处理工艺等因素的影响,我国轴承使用寿命等性能指标仍满足不了使用要求,每年都需要大量从国外进口。根据报道^[22],对6205-2RSLXI轴承采用自修复技术后,当试验周期达其21倍寿命时对轴承进行检测发现,该轴承的精度几乎没有变化,仍能保持初始的旋转精度和试前的游隙,观察其套圈滚道和滚动体表面发现,在摩擦表面基本没有磨损。结果表明,轴承经过金属磨损自修复后,轴承的使用寿命有大幅度提高,且能够减少因轴承失效而引起的事故和损失,这也大大减少了设备的停机维修时间,提高装备利用率。这一技术的实施,不仅可以使我国使用的进口轴承数量大幅度减少,还可以使我国成为轴承出口大国。

2.1.2 铁路内燃机车自修复

将金属磨损自修复材料应用到内燃机车活塞发动机上,发现金属磨损自修复使BJ型2008和DF11-063机车性能得到显著提高。同时提高了机车的在线利用率,减低机车检修率。我国内燃机车每年消耗燃油500多万吨,由于金属磨损自修复材料的引入,使得机车燃油消耗率下降4%,这样每年可节省大量中修费用。此外,在内燃机车柴油机上采用金属磨损自修材料,结果发现有显著的减磨效果,并且能够改善柴油机的技术性能和降低使用故障率。

2.1.3 发动机自修复

在海港渔船柴油机上采用金属磨损自修复技术发现,柴油机比以前工作状态相对稳定了,启动

快,加速猛,有劲,缸压提高,引擎声音柔和,噪音降低,燃烧充分,尾气排放正常,耗油减少,发动机温度较处理前明显降低,总体机械性能都得到了提高。因此,金属磨损自修复技术对修复已磨损的渔船柴油机磨损件是有效的,可恢复老、旧柴油机的性能,降低出海航行的停航率,延长柴油发动机的使用寿命。

2.2 金属磨损自修复研究存在的问题

金属磨损自修复对改善传统工程机械和零部件的使用性能及延长其使用寿命产生显著效果。当然,任何一项新技术的产生和发展都需要经过大量深入细致的研究和不断的改进、完善,这就需要在应用的实践过程中总结经验,发现新问题,揭示新规律。就轴承自修复而言,由于该技术在应用过程中的动力学、热力学和化学机理等基础科学问题认识不够深入,因此在应用试验中具有盲目性,使其应用的实际效果不够稳定,这就需要对不同条件下自修复表层的生成机理和规律进行研究;由于自修复成本偏高,很难大规模推广应用,需要研究成本较低的自修复材料,这样有利于自修复的推广及应用;要想进一步实现产业化和操作工艺的规范化就需要用户反复摸索;该技术受摩擦副形状和摩擦条件的限制,因此应用具有局限性,那么研究不同载荷条件下金属磨损自修复材料生成保护层的效果,就显得尤为重要。

3 结束语

近年来,随着金属磨损自修复技术的发展,表面改性技术也相应取得了进展。金属磨损自修复是关于摩擦学、化学和力学等多种学科交叉的技术,同时涉及多专业、多部门的系统工程,是多种高端技术与现代设备高度融合的体现。尽管自修复技术产业化发展仍存在局限性,但依然前景光明。因此,加强自修复技术的研究和开发,对提高设备的性能、延长使用寿命、预防设备故障、减免设备维修、提高设备技术保障水平具有重要意义。

参考文献:

- [1] 周培钰.金属磨损自修复材料在铁路内燃机车柴油机上的应用试验[J].铁道机车车辆,2003,23(5):13-15.
- [2] 戴振东,王珉,薛群基.摩擦体系热力学引论[M].北京:国防工业出版社,2002.
- [3] 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):47-49,53.

- [4] 郭凤炜.摩圣摩擦表面再生技术[C]//第十届全国耐磨材料大会论文专辑.沈阳:铸造杂志社,2003,52:1004-1006.
- [5] 王汝霖.润滑剂摩擦化学[M].北京:中国石化出版社,1994.
- [6] National Science Foundation (NSF). Next generation manufacturing (NQN) project[EB/OL]. [2016-05-21]. <http://www.nsf.gov/odl/palnewa/Publicat/nsf0050/manufacturing/nextgen.htm>.
- [7] NASA turns to universities for research in space-age materials [EB/OL]. (2002-09-19). <http://www.priceton.edu/pr/news/02/q3/0920-nasa.htm>.
- [8] Hegeman A J. Self-repairing polymers: repair mechanisms and micromechanical modeling[D]. Urbana: Department of Mechanical Engineering, University of Unoio at Urbana-Champaign,1997.
- [9] 夏延秋,杨文通,马先贵,等.纳米级铜粉改善润滑油抗磨性能的研究[J].润滑与密封,1998(5):43-44.
- [10] 刘维民,夏延秋,韩宁,等.碳钢表面渗硼层在油润滑条件下的摩擦磨损性能研究[J].摩擦学报,2002,22(5):347-351.
- [11] 王立光,胡泽善,叶毅,等.纳米氢氧化锰抗磨减磨添加剂的研究[J].润滑与密封,1999(5):30-32.
- [12] 乔玉林,姜海,毕志夫.应用纳米材料的新型原位自修复技术[J].工程机械与维修,2002(7):100-101.
- [13] 张津,李军,李春天,等.金属摩擦表面耐磨自修复技术的研究[J].表面技术,2004,33(5):7-8.
- [14] 董凌,陈国需,方建华.抗磨自修复添加剂的发展现状[J].合成润滑材料,2003,30(1):17-21.
- [15] 刘谦,许一,史佩京,等.机械零件摩擦磨损表面自修复研究进展[J].中国表面工程,2005,18(5):1-5.
- [16] 杨鹤,李生华,金元生.修复剂羟基硅酸镁存在时钢摩擦副的摩擦磨损特性研究[J].摩擦学报,2005,25(4):308-311.
- [17] 王磊,周新聪.不同工况对金属磨损自修复层形成的影响[J].润滑与密封,2009,34(2):62-64.
- [18] 李华峰,陈国需.磨损表面在线自修复研究[J].材料导报,2004,18(8A):288-290.
- [19] 刘永源,陈振明.金属磨损自修复技术在提高轴承寿命中的应用[J].哈尔滨轴承,2014,35(4):44-45,53.
- [20] 李华伟,董玉雪.金属磨损自修复技术在滚动轴承上应用的试验[J].制造技术与机床,2015(11):160-162.
- [21] 田萌,杨慧荣.金属磨损自修复技术在汽车发动机维修中的应用[J].河南科技,2015(4):40-41.
- [22] 方建华,陈波水,董凌.减摩自修复添加剂的应用和发展前景[J].合成润滑材料,2003,30(4):24-29.