

材料的磨损失效及其预防 研究现状与发展趋势

屈晓斌¹, 陈建敏², 周惠娣², 冶银平²

¹(中国航空工业供销总公司 北京 100027)

²(中国科学院兰州化学物理研究所固体润滑实验室 兰州 730000)

摘要: 论述了材料磨损失效的主要模式和引起磨损失效的各种可能因素及材料磨损失效的研究现状与发展趋势, 探讨了材料磨损失效研究所面临的课题和开展磨损失效研究的必要性

关键词: 磨损失效; 失效分析; 失效预防; 润滑; 固体润滑材料

分类号: TH117.1

文章标识码: A

文章编号: 1004-0595(1999)02-0187-06

磨损、腐蚀和断裂是材料失效的 3 种主要形式, 其中由摩擦所导致的磨损失效是包括航空材料在内的机电材料失效的主要原因, 约有 70% ~ 80% 的设备损坏是由于各种形式的磨损而引起的。磨损失效不仅造成大量的材料和部件浪费, 而且可能直接导致灾难性后果, 如机毁人亡等^[1]。英、美等国近年来对各自国家摩擦学状况的调查结果表明: 由于材料磨损失效所造成的损失估计每年都在上千亿美元; 改善润滑、降低磨损可能带来的经济效益约占各国国民生产总值的 2% 以上^[2]。我国由于技术落后、设备老化等多方面原因, 实际情况还要严重得多。调查结果表明, 我国在冶金和金属加工、石油和矿产资源开采、汽车及铁路交通、航空航天与核技术等国民经济支柱产业部门, 都存在着严重的磨损失效问题, 不仅每年造成约上千亿元人民币的经济损失, 而且是机械事故高发的重要原因之一, 一些先进的设计也往往因材料磨损失效问题而无法实施^[3]。因此, 开展材料磨损失效机理、失效分析和失效防治技术的研究, 不仅可以加深对材料磨损失效机理的认识, 丰富和完善材料摩擦学理论; 而且可以推动摩擦学新技术新材料的诞生, 使设备的摩擦学设计得到根本改善, 并由此带来显著的经济效益。本文概述了材料磨损失效的主要模式及引起磨损失效的各种可能因素, 综述了材料磨损失效的研究现状, 指出了材料磨损失效研究所面临的课题以及开展磨损失效研究的必要性, 以期对推动我国材料磨损失效研究有所裨益。

1 材料磨损失效的主要模式及失效原因分析

1.1 材料磨损失效的主要模式

材料磨损失效的模式在磨损失效的研究中具有十分重要的意义。确定磨损失效模式对于揭示失效机理、查明失效原因十分必要。一般根据引起磨损失效的主要磨损机制来确定磨损失效的模式, 图 1 给出了材料磨损失效的几种主要模式。

1998-08-21 收到初稿, 1999-03-10 收到修改稿/本文通讯联系人陈建敏

屈晓斌 男, 硕士, 高级工程师, 目前主要从事航空材料配套应用及管理方面的工作

磨粒磨损失效是指由外界硬颗粒或偶件表面的硬突起物在摩擦过程中引起的摩擦表面材料脱落或塑性变形所导致的失效,前者称为三体磨粒磨损,后者称为二体磨粒磨损,其特征在于造成部件失效的磨损来自于磨粒对摩擦副材料表面的犁削作用和塑性挤压变形。存

表 1 材料磨损失效的几种主要模式

Table 1 The main modes of wear failure of materials

Failure due to abrasive wear	Failure due to adhesion wear	Failure due to fatigue wear	Failure due to corrosive wear	Failure due to fretting wear
Three-body abrasive wear	General adhesion wear	Fatigue wear characteristic of propagation	Oxidative wear	Adhesion wear
Two-body abrasive wear	Scuffed wear		Corrosive wear originated from special mediums	Oxidative wear
	Seizured wear		Erosive wear	Fatigue wear
				Abrasive wear

在硬质磨粒并在摩擦表面上产生明显的磨粒划伤痕迹是判断磨粒磨损失效的必要条件。这种形式的磨损失效广泛存在于各类环境条件比较恶劣的机械设备中,有时并非是由于设计上的原因,具有一定的偶发性,而加强设备的维护和润滑管理是减少偶发性磨粒磨损失效的主要途径。

材料的粘着磨损失效是指在摩擦过程中,摩擦副材料表面之间由于发生了粘着/剪切效应,使摩擦表面材料发生脱落或向对偶表面转移而导致的失效,其特征是发生了摩擦副材料由一个表面向另一个表面或彼此之间的迁移,粘着结点强度越高,剪切深度越深,磨损越严重,直至发生胶合磨损。粘着磨损失效发生的可能性与摩擦副材料的材质有关,化学性质相似、互溶性好的弹塑性材料(如同种金属)构成的摩擦副更易发生粘着磨损;一些流体动压润滑的重载机械,由于在起动瞬间油膜尚未形成,极有可能发生粘着磨损失效。改善润滑,尤其是采用具有自润滑性能的固体润滑材料,或重新匹配摩擦副材料是预防或避免粘着磨损失效的主要途径。

疲劳磨损失效是指摩擦副表面在循环变化的接触应力作用下,由于材料疲劳剥落形成凹坑而导致的失效。一般来说,即使是在良好的润滑条件下,摩擦副表面的疲劳磨损依然不可避免,但大多表现为非扩展性的表面疲劳磨损。部件的疲劳磨损失效主要源于扩展性的表面疲劳磨损,其过程包括由于周期性变化的法向负载和切向摩擦力的作用(含滚动摩擦),在摩擦副次表面应力集中处萌生微裂纹,裂纹扩展到表面,形成磨损。其特征是在摩擦表面上存在痘斑状的凹坑。这种形式的磨损与载荷性质和运动形式有密切关系。摩擦副材料中的杂质、空穴、位错和内应力等,由于破坏了基体的连续性,在循环应力的作用下,形成应力集中源,容易产生疲劳裂纹并导致磨损。

腐蚀磨损失效是指在摩擦过程中,摩擦副材料与周围介质发生了化学或电化学相互作用,这种作用加剧了材料的磨损过程而导致的失效。其特征是化学腐蚀和机械磨损同时存在并互相促进。摩擦副之间存在腐蚀介质是腐蚀磨损失效的必要条件,形成的磨屑应是摩擦副材料与介质化学作用的产物。根据介质性质的不同,腐蚀磨损又可分为氧化磨损、特殊介质腐蚀磨损和气蚀磨损(严格来讲,气蚀磨损应该是另一种性质的磨损)等。腐蚀磨损失效(不含气蚀磨损)主要发生在与腐蚀性介质相接触(含偶然接触)的摩擦副中。一些在油润滑条件

下运行的机械,若润滑油选择不当或润滑油变质等,就有可能发生腐蚀磨损并导致失效

微动磨损失效是指相对固定的摩擦副材料(在设计上大多为静接触)表面之间,由于环境因素所带来的振幅很小的相对振动而产生磨损所导致的失效。微动磨损是一种典型的复合磨损,其机理较复杂,包括粘着、氧化、疲劳和磨粒作用等。一般从发生磨损部位的结构特征来判定微动磨损机理。几乎所有的机械都存在微动磨损,但微动磨损失效通常发生在各类紧固件、定位栓、榫头、销连接、铆接、锥套等连接件部位以及某些结构的结合部位。已有因微动磨损失效导致航空航天灾难性事故的研究报道。改善连接部位结构,对部件的结合面进行必要的润滑处理是防止微动磨损失效的有效途径。

1.2 磨损失效原因分析及预防

确定了磨损失效的模式并不等于找到了导致磨损失效的原因,这是由于材料的磨损特性并不仅仅由摩擦副材料所决定,而是整个摩擦学系统的性质。材料的磨损过程往往是多因素共同作用的系统过程和动态过程,有其特殊性和复杂性。影响材料磨损性能的各种因素包括:摩擦副材料(包括材质和表面处理);润滑技术(包括润滑剂和润滑方式);环境条件(包括温度、气氛和介质);摩擦条件(包括接触形式、运动形式、负荷以及速度);结构设计;润滑管理。对一个具体的磨损失效问题而言,如何透过现象看本质,在上述诸多影响因素中,找到起主导作用的因素,并提出合理的预防应对措施,是解决问题的难点和关键所在。为此我们应针对具体的磨损失效问题,收集已磨损报废的零件及其磨屑,并进一步查明该部件的摩擦工况,包括摩擦副的接触形式、运动形式、载荷、速度、介质、温度、湿度、润滑方式以及润滑剂种类等,确定润滑剂有无变质并检查润滑系统的工作情况,了解失效发生时设备的使用情况及日常维护保养情况。在充分掌握情况的基础上,应对磨损失效表面和磨屑进行仔细分析,检查磨损失效前后表面形貌和硬度等物理机械性能的变化,根据表面磨损特征和磨屑形状判定磨损失效模式,确定失效是由外界偶然因素(如不期而至的磨粒或杂物、冲击负载、断油等)引起的突发过程还是在设计工况条件下运行后的累计结果。对于后者,还需对磨损次表层进行分析,了解裂纹的形成部位及扩展方向,并由此确定磨损的发生和发展过程。对于有可能发生化学腐蚀磨损的部件,则需要对磨损失效表面和磨屑进行化学分析。如有必要,还应进行零件磨损失效的模拟试验。只有认真获取上述信息,并进一步结合失效零件摩擦学设计的合理性进行综合分析,才能对导致磨损失效的过程本质和主要原因有深入的认识;在此基础上,才有可能为磨损失效的预防提出合理的改进措施。

一般而言,除了外界因素、设备管理和润滑剂变质等非设计因素之外,引起机械零部件磨损失效的设计和工艺方面的原因主要有:摩擦副材料或表面处理(含热处理)工艺选择不当;零件的摩擦学结构设计(含润滑系统)不合理;零件的加工或安装精度未达到要求。

摩擦副材料是磨损失效的主体,摩擦副材料及其表面处理工艺的选择对于预防磨损失效具有极其重要的意义。一般根据速度、载荷、应力种类、介质、温度等摩擦工况条件和寿命要求等来确定摩擦副材料。此外还应根据可能发生的磨损的特征对所选材料进行必要的修正,如对有可能发生粘着磨损的摩擦副,就应选择互溶性差的材料;对有可能产生磨粒磨损的摩擦副,应选择硬质材料或硬质热处理工艺。可以说,材料是摩擦学设计的基础,这也正是近10多年来,摩擦学研究的重点由传统的润滑和润滑系统向材料科学(含表面工程)转移的原因所在。没有高性能的材料作为保障,就不可能有效地解决现代机械的磨损失效问题。

摩擦学系统的结构设计以及加工装配精度等对摩擦副材料的磨损行为也有至关重要的影响。利用摩擦学的最新研究成果进行摩擦学结构设计,可以有效地减轻摩擦副的磨损。原则上,合理的结构应该有利于润滑膜的形成与恢复、压力分布应该均匀,而且还应有利于散热和磨屑的排出。对于重载机械的流体动压润滑设计,应采取措施,防止机器起动瞬间可能发生的摩擦副拉伤。一些重要的齿轮和轴承,应采用密封结构,以防止外界杂物的混入,同时还应在润滑油回路中加装过滤装置,以除去油中可能成为磨粒的磨屑等固体颗粒。

2 材料磨损失效及防治研究的现状

材料磨损失效研究的目的主要是通过由失效结果到失效原因的逆向研究,在充分揭示失效机理的基础上,提出可行的预防措施,以改进有关机电设备的摩擦学设计。材料磨损失效研究具有目标明确、针对性强的特点。它与在实验室控制条件下的磨损机理研究互为补充。与腐蚀和断裂失效相比,人们对材料磨损失效的研究和认识要肤浅得多。这一方面是由于人们对材料磨损机理的研究远不如对材料腐蚀和断裂机理的研究那样深入透彻;另一方面是由于材料的磨损失效是一个逐步发展的累积结果,摩擦必定伴随磨损,但磨损并不等于磨损失效;由磨损到磨损失效实际上存在一个由量变到质变的转化,影响因素多,发展过程漫长,这就使研究工作的难度增大。所以,尽管磨损失效问题受到了包括专家和政府官员在内的有识之士的广泛重视,但时至今日,尚未形成系统、完整的磨损失效理论体系。

综观国内外关于材料磨损失效的研究,大体上可以归纳为如下 4 个方面:

(1) 摩擦副材料磨损失效机理及影响因素的研究: 针对具体的磨损失效问题,研究磨损失效的发展过程及影响因素,确定磨损失效的模式,分析导致磨损失效的原因,找出解决问题的办法^[4]。这是目前国内外研究磨损失效问题的一般方法,现有的材料磨损失效理论大多是在此基础上建立起来的。但客观而言,这样得到的各种类型材料的磨损失效机理以及所确立的各种类型的磨损失效模式并未跨越人们对材料磨损机理的认识和业已确立的理论模式,只是材料磨损理论的逆向应用而已。

(2) 润滑剂的摩擦失效与摩擦副材料磨损失效的关系: 润滑剂是构成摩擦学系统的重要组元,其性状不仅对摩擦副材料的磨损失效有直接影响,而且润滑剂本身在摩擦过程中的失效也是摩擦学系统失效的重要组成部分。润滑剂的摩擦失效包括氧化失效、剪切失效和含杂质变质失效等。研制高性能的添加剂并进行工艺优化复配是避免润滑剂摩擦失效的重要途径之一,国内外在这一方面已经做了许多工作^[5,6];防止因润滑剂失效而导致摩擦副磨损失效的另一个重要途径是实现润滑剂失效的在线实时检测,目前已经实用化的技术包括铁谱、质谱、光谱以及各种化学分析技术等^[7,8]。

(3) 适用于极端苛刻工况条件下的新型润滑材料的研究: 工况条件苛刻,超出了材料的极限使用范围是造成机电材料非正常磨损失效的重要原因之一,从这个意义上讲,高性能的材料是有效预防磨损失效的基础。尤其是随着航空航天等现代高新技术产业的发展,机械的设计工况越来越苛刻,常规材料已经远远满足不了在极端苛刻工况条件下运行的摩擦学系统的使用要求。以固体润滑材料为代表的特种润滑材料正是在这一背景下应运而生的一类新型润滑材料,它有效地突破了常规润滑材料的使用极限,使在高温、高真空、高负载、高速、强辐射、特殊介质等极端苛刻工况条件下的摩擦学设计成为可能,同时也为磨损失效的预防提供了更大的选材空间,为现代机械磨损失效预防奠定了材料基础^[9]。近年来,国内外

在这方面开展了大量研究, 发展了多种类型的新型润滑材料和技术^[10], 使一些本来因磨损失效问题困扰而无法实现的设计成为可能^[7], 促进了相关产业的技术进步和发展

(4) 统一磨损失效的失效点判定标准, 建立部件磨损失效规范: 失效点的判定是材料磨损失效研究的难点之一。与断裂失效有明显的失效点不同, 磨损失效的判定因机械部件而异, 没有统一的标准。这是由于磨损本身是与摩擦伴生的摩擦面材料的逐步损失、迁移或变形的过程; 由磨损到磨损失效实际存在一个由量变到质变的转化; 对不同的机械, 这一转化的临界点不同。一般根据机电装备随部件的磨损状态的变化而变化的运行状态是否还能达到该机械的设计要求来设定临界点。对于一些精密机械, 有时即使是很微量的磨损, 由于影响了设备的运行精度和功能, 也可视为失效。国外有人已将一些标准件的磨损表面形貌编成图谱, 如美国迪尔公司编写的《零件损坏鉴定》^[11]和日本小松制作所编写的《零件检查指南》等, 可用于磨损失效分析参考, 国内尚缺少这方面的指导性资料

3 磨损失效研究所面临的课题及发展趋势

磨损失效研究包括摩擦副材料的磨损失效机理研究及磨损失效的预测和预防研究 2 个主要方面, 是一项应用背景很强的应用基础研究。当前磨损失效研究所面临的主要任务是针对国家的发展要求和若干支柱产业部门所面临的紧迫问题, 在解决具体的材料磨损失效问题的同时, 建立完善材料的磨损失效理论和预测预防体系, 建立主要部件磨损失效的标准技术规范。鉴于特殊工况条件下磨损失效问题的多发性以及固体润滑技术在防治磨损失效问题方面的重要作用, 应重点发展适用条件范围宽、可用于解决多种工况条件下的摩擦学问题的新型润滑材料。同时还应在基础产业部门推广摩擦学新技术、改进机械的摩擦学设计, 以便解决重点生产设备的磨损失效问题。目前亟待开展的研究课题有:

(1) 多种材料在不同工况条件下的磨损失效机理的研究, 包括润滑剂的摩擦失效机理(氧化失效、剪切失效、含杂失效)及其与摩擦副材料磨损失效关系的研究;

(2) 材料磨损失效的预测和预防技术的研究, 包括发展润滑剂摩擦失效的在线实时检测技术等;

(3) 建立典型部件的磨损失效标准数据库, 以此为基础, 建立部件磨损失效诊断的技术规范, 并出版相应的技术手册;

(4) 针对航空、航天、航海、核工业及高速铁路等高技术产业和军工产业部门对解决极端苛刻工况条件下的材料磨损失效问题的特殊要求, 开展高性能金属基自润滑复合材料、聚合物基自润滑复合材料、特种固体润滑涂层和薄膜材料的研究, 提高摩擦学设计水平, 解决高温、真空、辐射、特殊介质及高负荷等特殊工况条件下的磨损失效问题, 从而为这些产业的发展奠定摩擦学材料和设计的技术基础

(5) 针对国内基础产业部门所存在的磨损失效问题, 加强现有摩擦学研究成果的技术转化工作, 发挥摩擦学新材料新技术在解决民用产业部门的磨损失效问题方面的作用, 解决量大面广的有代表性的磨损失效问题, 为国家基础产业部门的技术进步作出贡献

综上所述, 预期将初步建立系统的材料磨损失效理论体系(包括明确各类材料在不同工况条件下的磨损失效机理、开发磨损失效模式的诊断技术、建立国家部件磨损失效标准的技术规范); 在几种主要类型的特种润滑材料的研究和应用方面达到国际先进水平; 在基础产业部门推广摩擦学新材料新技术, 优化机械的摩擦学设计, 从根本上改变目前因磨损失效给

国家造成巨大经济损失的局面 今后不仅应该继续针对高性能机电产品的设计要求,开展特殊工况条件摩擦学材料的研究,还应着眼未来,开展前瞻性预研课题的研究工作,使我国的摩擦学设计和磨损失效预防研究跃上新台阶

参 考 文 献

- [1] 刘英杰,成克强 磨损失效分析[M]. 北京:机械工业出版社,1991
- [2] 薛群基,党鸿辛 摩擦学研究的发展概况[J]. 摩擦学学报,1993,13(1): 73~ 81
- [3] 张剑锋,周志芳 摩擦磨损与抗磨技术[M]. 天津:天津科技翻译出版公司,1993
- [4] 陈建敏,周惠娣,薛群基 磨损失效与摩擦学新材料[C]. 第三届全国机电装备失效分析预测预防战略研讨会论文集 北京,1998 73
- [5] 任天辉,夏坚,钟昀等 二乙基二硫代氨基甲酸镧配合物润滑脂添加剂的摩擦学研究[J]. 摩擦学学报,1998,18(3): 268~ 272
- [6] 刘维民,Klaus E E, Duda J L. 聚乙烯醇及磷酸酯气相润滑下氮化硅的磨损特性研究[J]. 摩擦学学报,1998,18(2): 108~ 112
- [7] 颜志光,党鸿辛,陈建敏等 新型润滑材料与润滑技术实用手册[M]. 北京:国防工业出版社,1999
- [8] 赵方,谢友柏,柏子游 油液分析多技术集成的特征与信息融合[J]. 摩擦学学报,1998,18(1): 45~ 52
- [9] 党鸿辛,高金堂 空间技术用固体润滑的发展现状与展望[J]. 摩擦学学报,1992,12(1): 1~ 7
- [10] 陈建敏,冶银平,党鸿辛 粘结固体润滑膜及其应用[J]. 摩擦学学报,1994,14(2): 180~ 189
- [11] Moline, Luinos 零件损坏鉴定[M]. 杨秋荪译 上海:上海科学技术出版社,1982

Current State and Development Trend of the Research on Material Wear Failure and Failure Prevention

QU Xiao-bin¹, CHEN Jian-min², ZHOU Hui-di², YE Yin-ping²

¹(The Head Supply and Marketing Company of China
Aviation Industry Beijing 100027 P R China)

²Laboratory of Solid Lubrication Lanzhou Institute of Chemical Physics
the Chinese Academy of Sciences Lanzhou 730000 P R China)

Abstract Wear failure is an important failure mode of mechanical and electrical materials including aviation materials. The major wear failure modes and various factors causing wear failure are summarized. The current state of wear failure research and the development trend are reviewed. The projects awaiting further investigation are suggested, and the necessity to conduct research of wear failure of materials is pointed out.

Key words wear failure; failure analysis; failure prevention; lubrication; solid lubricating materials

Classifying number: TH 117. 1