

技术手册 空间润滑材料与

刘维民

翁立军

孙嘉奕

编著



62



科学出版社

www.sciencep.com

空间润滑材料与技术手册

刘维民 翁立军 孙嘉奕 编著

V519-62
L684

科学出版社

北 京

内 容 简 介

作者在多年从事空间润滑材料技术研究工作的基础上,对相关研究结果进行了总结,并借鉴国内外有关研究成果,对空间润滑材料技术进行了较为系统的分析和阐述。全书共分为八章,首先介绍摩擦学基础,其次对固体润滑材料与技术、液体润滑材料与技术、固体-液体复合润滑、空间机械摩擦运动部件及材料、润滑方式的选择、润滑材料的试验技术方法、润滑材料的空间环境行为进行了阐述。

本书可供航天运动机构设计者和机械工程师参考,也可供从事材料摩擦学的高等院校教师、科研院所科研人员及研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

空间润滑材料与技术手册/刘维民,翁立军,孙嘉奕编著. —北京:科学出版社,2009

ISBN 978-7-03-025591-4

I. 空… II. 刘… III. 航天器-润滑剂-技术手册 IV. V519-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 166020 号

责任编辑:王志欣 周 炜 / 责任校对:赵燕珍
责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 9 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2009 年 9 月第一次印刷 印张:10 3/4

印数:1—2 000

字数:203 000

定价:50.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(路通))

前 言

火箭、卫星、飞船、空间实验室（站）和星际探测器等空间技术工业的发展要求解决一系列润滑科学与技术问题，而这些润滑问题通常涉及超高真空、高低温、氧化还原介质、高比负荷、高低速、多次启-停、原子氧、射线（紫外、宇宙射线等）等特殊环境和工况。空间润滑材料和技术一般要求具有高可靠性，某些情况下还要求润滑材料具有长期可靠的使用寿命（如卫星和星际探测器等）。美国 NASA、欧洲 ESA 及俄罗斯宇航局的研究均表明，相当大比例空间机械部件的失效与润滑密切相关。为此，美国 NASA、欧洲 ESA 通过二十多年的努力分别出版或编写了各自的 *Handbook of Space Tribology*。

为了解决我国的空间润滑问题，近年来我们对国内部分前期的工作进行了归纳总结，并开展了系列的新型空间润滑材料与技术研究，试图揭示空间环境条件下材料磨损与润滑的机理，建立一些空间润滑材料设计制备的理论方法和技术规范，发展多种可满足超高真空、极端高低温、辐照、超高速或低速、重载、氧化还原介质等空间条件使用要求的润滑材料与技术，并编写了本书。编写本书的目的在于为航天运动机构设计者和机械工程师提供参考，帮助他们决定如何更好地处理和使某一特定应用体系中的运动部件具备良好的润滑性能；同时本书也可以为空间用摩擦副的测试提供相关的指导。

本书共分为八章，由刘维民提出构思和组织框架，并对全书进行了审定。具体章节撰写分工如下：第一章由刘维民完成，第二章由刘维民、翁立军、王齐华、周峰、王廷梅完成，第三章由刘维民、胡丽天、冯大鹏完成，第四章由刘维民、郝俊英完成，第五章由孙嘉奕完成，第六章由翁立军、孙嘉奕完成，第七章由孙嘉奕、翁立军完成，第八章由刘维民、高晓明、孙晓军、王晓龙、翁立军、裴先强完成。

本书的编写得到我国著名材料化学和润滑材料专家、中国工程院院士薛群基先生的关心和指导，并为本书执笔作序，在此表示由衷的感谢！

本书的部分内容取自作者所承担的国家自然科学基金委员会创新研究群体科学基金“空间润滑材料与技术研究”、科技部“973”计划“苛刻环境下润滑抗磨材料的基础研究”及国防科工委（局）等项目的研究结果，作者对此宝贵的支持深怀感激之情。同时，作者也对所有参加编撰本书的同事及参与实验工作的全体人员 and 研究生表示感谢！

随着摩擦学领域科学技术的进步，新的润滑材料和技术会不断涌现，因此，

我们将在一定时期对本书进行更新和完善，期望能够不断满足从事机械装置，尤其是空间运动机构的设计者和机械工程师的需要。

根据我们的理解，出版一部手册需要大量的研究、实验、应用等工作积累和总结，由于学识水平所限，书中难免存在疏漏和不足之处，敬请读者批评指正，以便通过今后的进一步研究不断充实和完善。

作 者

2009年6月

序

空间润滑材料技术与常规润滑材料技术相比具有其特殊性，主要表现在空间润滑材料和技术应用环境及运动工况迥异于大气环境。空间应用通常涉及超高真空、微重力、高低温交变、氧化还原介质、原子氧和紫外光辐照（舱外系统）等特殊环境，运动工况则表现为对于同一系统存在轻载/高速、重载/低速、高比负荷、高速、低速、真空环境中长期停止随机启动等多种运动并存的状态，为此要求根据各运动机构及运动部件具体工况条件分别进行润滑设计。随着我国航天事业的发展，空间润滑的重要性得到越来越普遍的认识，航天运动机构设计者和机械工程师迫切需要一部具有手册性质的图书作为工作中的参考或指导。

作者在借鉴前人多年工作的基础上，组织相关科研人员对近 20 年空间润滑材料与技术领域的工作进行了归纳总结，撰写了《空间润滑材料与技术手册》一书，并邀我为之作序。我通读了书稿，颇为欣喜。

从书中可以看到，尽管我国在空间润滑材料与技术研究系统性方面与国外航天大国相比仍存在一定的差距，但通过相关科研工作者的努力，这些差距不断被一步步缩小，某些研究方向所取得的研究成果已达到国际先进水平。与美国及欧洲出版的 *Handbook of Space Tribology* 相比，《空间润滑材料与技术手册》除对摩擦学的相关基础理论进行了阐述外，立足我国空间润滑材料和技术的现实，对固体及液体润滑、润滑材料选择和试验技术等进行了较全面的论述并给出了若干应用实例。尤其值得指出的是，该书还报道和分析了润滑材料的空间环境行为，论述了空间固体-液体复合润滑的研究结果，对提高我国空间运动部件的可靠性和使用寿命具有重要的参考价值和指导作用。该书理论与实践相结合，是航天润滑领域第一本具有重要理论意义和应用价值的参考书。《空间润滑材料与技术手册》的出版将有力推动我国材料摩擦学的学科发展、促进空间润滑材料的研究与应用、满足我国航天事业对润滑材料与技术不断增长的需求。

薛群基

2009 年 6 月

目 录

序

前言

第一章 摩擦学基础	1
1.1 摩擦和磨损的起源及润滑作用	1
1.1.1 摩擦和磨损的起源	1
1.1.2 摩擦和磨损定义	2
1.2 摩擦学的发展历史与研究方法	4
1.2.1 摩擦学的发展历史	4
1.2.2 摩擦学的研究方法	5
1.3 液体润滑材料的种类和作用	6
1.4 固体润滑材料的种类与作用	7
1.4.1 固体润滑材料的种类	7
1.4.2 固体润滑材料的作用	7
1.4.3 固体润滑材料的基本性能	8
参考文献	9
第二章 固体润滑材料与技术	11
2.1 固体润滑材料及技术的发展	11
2.2 固体润滑材料类型、结构及性能	11
2.2.1 层状结构固体润滑材料	12
2.2.2 低摩擦聚合物	14
2.2.3 软金属	15
2.2.4 低摩擦非层状无机化合物	16
2.3 黏结固体润滑薄膜/涂层	18
2.4 物理气相沉积固体润滑薄膜	23
2.4.1 物理气相沉积润滑薄膜的种类	23
2.4.2 物理气相沉积 MoS_2 基润滑薄膜	24
2.4.3 物理气相沉积纳米结构 MoS_2 基润滑薄膜	26

2.4.4 物理气相沉积固体润滑薄膜在空间技术中的应用	27
2.5 聚合物自润滑复合材料	28
2.5.1 纤维增强聚合物自润滑复合材料	28
2.5.2 聚合物轴承保持器材料	32
2.6 纤维织物固体润滑复合材料	36
参考文献	37
第三章 液体润滑材料与技术	41
3.1 液体润滑	41
3.2 空间用液体润滑剂的主要种类	44
3.2.1 全氟聚醚 (PFPE)	44
3.2.2 聚 α -烯烃 (PAO)	47
3.2.3 多烷基化环戊烷 (MACs)	47
3.2.4 硅烃 (SiHC)	48
3.2.5 聚硅氧烷	48
3.2.6 合成酯	50
3.2.7 精制矿物油	50
3.3 几种空间润滑油的性能	51
3.4 空间润滑脂	57
3.4.1 润滑脂简介	57
3.4.2 空间用润滑脂的性能	58
3.5 空间运动部件液体润滑方案实例	66
3.6 空间液体润滑剂爬行屏障材料	68
参考文献	69
第四章 固体-液体复合润滑	71
4.1 概述	71
4.2 固体-液体复合润滑的组合	72
4.3 固体-油脂复合润滑体系的初步研究进展	74
4.3.1 固体-液体复合润滑体系的设计	74
4.3.2 MoS ₂ 基复合薄膜-油脂复合润滑体系	75
4.3.3 AgCu-油脂复合润滑体系	78
4.3.4 DLC-油脂复合润滑体系	78

4.3.5 TiAlC-油脂复合润滑体系	81
参考文献	83
第五章 空间机械摩擦运动部件及材料	85
5.1 概述	85
5.2 轴承	87
5.2.1 轴承类型及型号	87
5.2.2 空间用滑动轴承	87
5.2.3 空间用球轴承的设计和选用	89
5.2.4 保持器材料	92
5.2.5 轴承的润滑	98
5.3 齿轮	103
5.3.1 齿轮用材料	104
5.3.2 齿轮润滑	104
5.4 蜗轮/蜗杆	109
5.5 谐波传动	110
5.5.1 谐波齿轮传动的工作原理	111
5.5.2 谐波齿轮传动的特点	112
5.5.3 谐波齿轮传动的润滑技术研究现状	113
5.5.4 谐波减速器固体润滑	114
5.5.5 固体润滑谐波减速器传动性能研究	116
5.6 滑动电接点材料	118
5.7 其他空间运动部件	119
参考文献	120
第六章 润滑方式的选择	124
6.1 润滑方式的选择阶段	124
6.2 运动部件经历的环境及其影响	124
6.2.1 太空环境及影响	124
6.2.2 地面贮存环境和发射期间的环境及影响	126
6.3 润滑方式及选择	126
6.4 通过试验确定运动部件的实际使用性能	127
6.5 空间润滑处理部件的地面贮存和试验	127

参考文献	128
第七章 润滑材料的试验技术方法	129
7.1 空间用润滑材料性能指标及测试方法	129
7.2 材料摩擦磨损试验机	133
7.3 模拟试验和组件级测试	136
参考文献	138
第八章 润滑材料的空间环境行为	139
8.1 空间环境对润滑材料的影响	140
8.2 原子氧对润滑材料影响效应的模拟试验	145
8.2.1 地面模拟试验设备	145
8.2.2 空间润滑材料地面模拟试验结果	146
8.2.3 原子氧对空间液体润滑剂影响的试验结果	154
参考文献	158

第一章 摩擦学基础

1.1 摩擦和磨损的起源及润滑作用

1.1.1 摩擦和磨损的起源

早在史前,人们就已经注意到摩擦现象,利用摩擦产生的热来取火。大约在9000年前,人类学会利用滑橇运输,并且学会了使用水作为润滑剂。距今约4000年前,古埃及人曾经使用液体润滑剂来尽量减小运输重物所需的力量。根据相关考古学研究结果可以推断,美索不达米亚大约在公元前3500年就已经认识到滚动摩擦比滑动摩擦小。据史书记载^[1],我国约在公元前1500年就已出现结构完善的古车,其车轴使用了青铜护圈,并采用动物脂肪或植物油与石灰混合组成的润滑脂进行润滑。

对摩擦现象进行科学的分析始于15世纪的文艺复兴时期。1470年,达·芬奇(da Vinci, 1452~1519)着手将石头和木头用于固体摩擦的实验研究,发现摩擦力与载荷成正比而与名义接触面积无关,他还首次引入了摩擦系数的概念(用摩擦力与正压力之比来表示),指出“对于两光滑表面,每一个摩擦物体所具有的摩擦阻力等于自身重量的四分之一”^[2]。

1699年,阿蒙顿(Amontons, 1663~1705)在前人研究的基础上,通过大量试验发现摩擦力与法向载荷成正比,与名义接触面积无关;摩擦阻力的大小等于物体自重的三分之一。后来,人们将阿蒙顿的发现概括为阿蒙顿干摩擦定律。在解释这些摩擦定律时假设表面凹凸不平,摩擦则源于接触表面微凸体的互嵌作用,此即“摩擦的凹凸假说”^[3]。

与阿蒙顿同时代的帕朗(Parent, 1666~1716)和欧拉(Euler, 1707~1783)将摩擦力引进了力学体系。帕朗首先将摩擦力引入静力学体系,他于1704年提出了“摩擦角”概念,从理论上阐述了分析摩擦力作用效果的方法。欧拉则将摩擦力引入了动力学体系。18世纪中叶,库仑(Coulomb, 1736~1806)系统地研究了平面的摩擦、绳缆的摩擦、枢轴承的摩擦及滚动摩擦。1785年,库仑在进行大量试验的基础上先后制定了有关固体摩擦的一些法则,进一步完善了摩擦定律。库仑关于摩擦的研究汇集了自达·芬奇以来多位科学家的研究成果,使得对摩擦现象的认识提高到新的水平。

黏附理论的萌芽出现于 18 世纪。1734 年, 德萨古利埃 (Desagulier, 1683~1744) 首先提出了分子说, 指出产生摩擦力的真正原因是两物体摩擦面之间存在的分子力, 但该学说在当时几乎无人问津。从 19 世纪末到 20 世纪初期, 如何解释摩擦定律成为争论的焦点, 出现了有名的“凹凸理论”与“黏附理论”之争。直到 20 世纪 20 年代, 托姆林森 (Tomlinson)、哈迪 (Hardy) 等以分子说为基础, 进一步提出了摩擦的“黏附理论”。此后, 霍尔姆 (Holm)、鲍登 (Bowden) 等相继发现, 表观几何接触面积同两个表面上微凸体形成的“真实”接触面积之间存在很大差距。1950 年, 鲍登和泰伯 (Tabor) 基于相关实验结果, 假设微凸体接点存在分子黏附力, 并提出被公认为“具有总结性”的摩擦理论, 指出摩擦过程同时伴随变形过程和黏附过程^[3,4]。

达·芬奇还完成了针对磨损问题的最初研究。他发现, 磨损随载荷的增加而急剧增加, 同时磨损方向不一定沿铅垂方向, 而是沿载荷的主向量方向。为了减少磨损, 他研制了一种滑动轴承, 并建议选用一种含 30% 铜和 70% 锡的合金制造其衬套。此后, 直到 20 世纪 30 年代, 人们才着手立足于科学基础来系统地研究磨损。1929 年, 德国的 Füchsel 提出金属在干摩擦下的磨损是变形过程及金属变形部分的分离 (剥落) 过程。1942 年, Fink、Mailänder 及 Dies 等对 Füchsel 的理论进行补充, 指出在磨损过程中变形金属会发生氧化, 因而环境条件对金属磨损具有重要影响。

直至 20 世纪 50 年代, 关于磨损的研究取得了新的发展。Feng、Burwell 和 Strang 等发现, 金属与金属配副时, 金属可从一个表面向另一个表面转移。Kerridge 指出, 转移的金属发生氧化并形成氧化层, 金属氧化层的磨耗过程表现为“缓和”磨损过程; 而当转移的金属直接发生磨耗时, 则产生“剧烈”磨损。阿恰德 (Archard) 提出了关于金属表面在缓和磨损状态下磨损的经验定律, 指出磨损体积同载荷和滑动距离成正比, 而与两个相互作用的金属材料中较软材料的硬度成反比。1957 年, 鲍威尔 (Burwell) 将磨损机理划分为黏着磨损、磨粒磨损、腐蚀磨损及表面疲劳磨损^[5]。

1.1.2 摩擦和磨损定义

两个相互接触的物体在外力作用下发生相对运动或具有相对运动趋势时, 在接触面之间会产生阻止其发生相对运动或相对运动趋势的阻力, 这个阻力称为摩擦力。摩擦力的方向沿着接触面的切线方向与两物体相对运动方向或相对运动趋势的方向相反。

相互接触的两物体有相对运动趋势时的摩擦力称为静摩擦力。当施加的外力超过最大静摩擦力时, 物体间将发生相对运动, 这时的摩擦力称为动摩擦力。库仑摩擦定律认为, 摩擦力 F 与两接触面积间的法向载荷 P 成正比, 即

$$F = \mu P \quad (1-1)$$

式中： μ 为摩擦系数。通常，最大静摩擦力大于动摩擦力。

对于摩擦产生的原因，主要形成了机械联结、分子吸引、摩擦黏着、分子-机械、摩擦能量等理论^[6]，英国物理学家德萨古利埃提出了产生摩擦力的主要原因是两摩擦表面间所存在的分子吸引力，即分子吸引理论，之后尤因、哈迪、托姆林森等都用分子吸引理论来解释摩擦产生的原因。英国的鲍登于 1950 年提出了著名的摩擦黏着理论，这一理论认为相接触的两表面在载荷作用下，某些接触点的单位压力将会很大而引起局部焊合，这些焊合点在两表面相对运动时会被剪断，剪断这些焊合点的力即是摩擦力。同时，如果两表面中有一表面较硬，则硬表面的粗糙微凸体顶端会在较软表面上产生犁沟，产生这种犁沟的力也是摩擦力，所以摩擦力是剪切阻力与犁沟阻力之和。

摩擦一般会产生磨损，磨损是一种综合了机械、物理和化学变化的现象。材料的磨损包括黏着磨损、磨粒磨损、腐蚀磨损、疲劳磨损、氧化磨损、微动磨损等。黏着磨损是真实接触区的黏着点在两表面相对滑动时剪切破坏，接触点表面的材料由一个表面转移到另一个表面而引起的磨损，这种磨损是干滑动（无润滑）接触条件下最基本的磨损机理。磨粒磨损是硬度较大表面的突起和硬质颗粒的切削作用产生的磨损，磨粒磨损机理主要是磨料的机械作用，磨损程度与磨料的尺寸大小、形状、固定程度以及载荷作用下磨料与运动表面的机械性能有关。腐蚀磨损是由于在摩擦过程中，摩擦副与周围介质发生化学或电化学作用而产生的材料损失现象，其中包括润滑剂对表面的腐蚀作用。氧化磨损是最常见的腐蚀磨损方式，另外还有特殊介质腐蚀磨损和气蚀磨损。疲劳磨损是摩擦时在表面由周期性的载荷作用，使接触区产生裂纹而破坏，并生长形成磨损粒子。疲劳磨损包括分层磨损，磨损粒子以片状形式存在。点蚀和剥落是主要在滚动接触中出现的疲劳磨损形式，裂纹来自表面下应力集中源。微动磨损是一种复合式磨损，是在两表面之间由于小的振幅振动而产生的磨损。

材料的磨损率（wear rate） W_r 一般定义为单位滑动距离、单位负荷所产生的磨损量（体积或质量），即

$$W_r = \frac{V}{PL} \quad (1-2)$$

式中： V 为磨损体积； P 为负荷； L 为滑动距离。

润滑抗磨材料作用于两个摩擦表面之间（图 1.1），用于减小摩擦、降低或避免磨损，是各类运动副承载、减摩、延长工作寿命、提高可靠性的关键，涉及流体润滑、薄膜润滑、边界润滑和固体润滑等。当摩擦副材料为金属和合金时，表面存在一个硬化层或材料变形层，该层之上是一个微晶或非晶结构区（贝氏

层)。许多情况下,表面都能产生化学反应,形成氧化层(或氮化层、硫化层、氯化层)。此外,环境气氛在表面还会形成吸附膜(物理吸附膜或化学吸附膜),加上润滑油膜,组成一个复杂系统。摩擦副接触区的表面波纹度、粗糙度、表面膜性能,润滑材料与固体材料的耦合作用等对摩擦副的寿命和性能都具有重要影响。

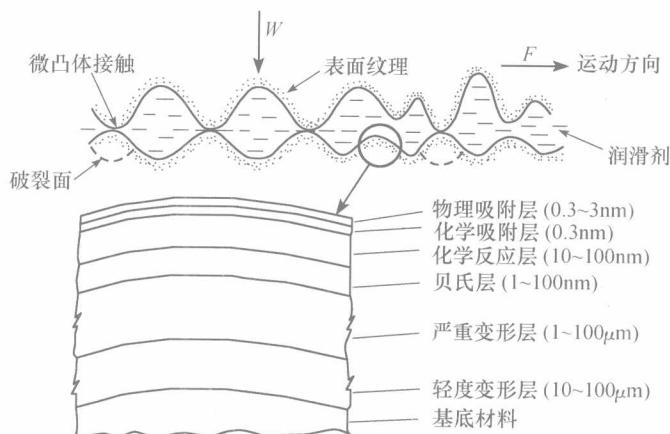


图 1.1 摩擦副表面与界面

1.2 摩擦学的发展历史与研究方法

1.2.1 摩擦学的发展历史

摩擦、磨损和润滑作为一门学科形成于 20 世纪 60 年代中期,被称为“摩擦学”(tribology)。tribology 一词源于希腊语“tribos”,其含义是摩擦或磨损的科学。该词由英国乔斯特(Jost)于 1966 年 3 月在其主持撰写的“英国润滑教育与研究现状和工业需求报告”中首先被提出来,此后摩擦学作为一门独立的学科得到蓬勃发展^[5]。

进入 20 世纪 60 年代,摩擦学的研究重点之一从经典的流体润滑理论转向特殊介质和极端环境工况下的润滑理论,如超层流润滑、多向流体和流变润滑理论等;与此相适应,关于弹性流体润滑理论与应用的研究取得了重大进展。汽车工业的发展促进了合成润滑油、脂和润滑添加剂技术的不断进步。20 世纪 70 年代,润滑技术成为摩擦学的研究重点。随着弹性流体基础理论以及静压和动压润滑理论的发展,对边界润滑条件下摩擦作用的研究不断深入。20 世纪 80 年代,摩擦学研究的重点转向磨损,而近代表面分析技术的飞速发展对磨损研究奠定了良好的基础。目前,材料磨损研究已从早期的宏观现象分析转向微观机理研究,

现代表面分析技术在揭示磨损过程中表面层组织结构与物理化学变化方面的应用受到了高度关注。随着近代工业和航空、航天、核能利用等高技术工业的发展,固体润滑的研究获得了长足进展。二硫化钼、石墨、聚四氟乙烯(PTFE)、氧化物,以及多种聚合物基、金属基、陶瓷基自润滑复合材料等新型固体润滑材料相继在军事和民用工业领域获得了成功应用。同时,大量先进的新工艺和新技术如等离子喷焊、快速电刷镀、离子镀、复合热处理、高能激光热处理、离子束注入、化学气相沉积及物理气相沉积等应运而生。20世纪80~90年代,随着生物摩擦学、陶瓷摩擦学、机械传动摩擦学、空间摩擦学、核反应系统摩擦学等分支学科的形成,摩擦学研究领域和内容进一步向广度和深度发展。近十几年来,计算机工业、微型机械及纳米技术的发展推动了微观摩擦学(纳米摩擦学或分子摩擦学)的研究。与早期不同,当代摩擦学已发展成为多学科交叉的综合性学科,研究领域涉及材料学、化学、物理、机械、表面工程、力学及热力学等多门学科^[7,8]。

1.2.2 摩擦学的研究方法

1. 由宏观表面到微观表面的研究

摩擦发生在材料表层,故表层的变化及接触表面的相互作用对摩擦磨损性能具有决定性的影响。近代表面科学技术的发展为研究摩擦表面的物理、化学性质提供了先进的测试手段,目前,扫描电子显微镜、原子力显微镜、多功能X射线光电子能谱仪等均已在摩擦学研究中得到广泛应用。现代表面分析技术能够更好地揭示磨损过程中表面层组织结构及其物理化学变化,从而为摩擦副材料选择和抗磨损设计提供理论依据。

2. 由定性分析到定量计算

计算机和数值计算技术的发展,使得对磨损机理、润滑理论进行准确的定量计算成为可能。根据所建立的相关定量动态数学模型,有可能实现磨损和润滑实际问题的定量分析。

3. 从单因素研究到多因素综合性研究

摩擦学具有多学科交叉特性,摩擦过程具有高度复杂性,为了正确分析和解决摩擦学问题,必须兼顾多种参数和影响因素及其复杂的相关性。为此有必要利用系统分析方法对摩擦学系统进行综合研究,揭示其内在规律,以便为确定最佳摩擦工况条件和系统结构提供依据。

4. 从静态研究到动态研究

摩擦磨损过程伴随着相对运动,故应当强调动态条件下摩擦原理和磨损规律的研究,其中,机械零部件磨损在线监测及预防具有重要的工程应用价值,可有效保证设备运行寿命和可靠性。目前,铁谱仪和光谱分析仪等已被结合用于机器运转过程中磨损状态的监测。

1.3 液体润滑材料的种类和作用

润滑(lubrication)是减小摩擦、降低或避免磨损的最有效技术方法,润滑通常使用液体或固体润滑剂予以实现。

空间用液体润滑剂包括空间用润滑油和润滑脂。空间用润滑剂通常应具有极低的蒸气压、低倾点和良好的黏温性能以及润滑性能。空间用润滑油分为合成油和矿物油两大类。其中空间常用的合成油有全氟聚醚(perfluoroalkylpolyether, PFPE)、聚 α -烯烃(PAO)、多烷基化环戊烷(MACs)、硅油、聚醚、聚酯、聚苯醚、磷酸酯以及氟氯烃等。润滑脂按稠化剂类型可分为皂基润滑脂、非皂基润滑脂和烃基润滑脂三大类,目前航天用润滑脂主要为复合锂基脂或PTFE基润滑脂。

液体润滑的作用包括以下几点。

1) 降低摩擦

在摩擦副接触表面之间引入润滑剂并形成润滑膜后,可以将接触表面完全隔开,从而使干摩擦转变为润滑剂分子间的内摩擦,显著降低摩擦阻力和能耗。

2) 减小磨损

摩擦副接触表面之间形成的具有一定强度的润滑膜能够支撑载荷,从而减轻机械(零件)的磨损,延长设备的使用寿命。

3) 冷却降温

润滑剂能够带走摩擦产生的大部分热量,避免机件过热。

4) 防腐防锈

附着于金属表面的润滑油分子可以隔离空气、水蒸气及腐蚀性气体,从而防止摩擦表面发生腐蚀、生锈。

5) 冲洗作用

润滑剂循环流动系统可以冲洗并去除摩擦表面的污染物及磨屑等,有利于减轻磨粒磨损和腐蚀磨损。

6) 密封隔离

机械零部件如发动机汽缸与活塞环之间存在一定的间隙,加入润滑剂可以填

充零件间隙、增加密封性能，从而在一定程度上防止水汽、灰尘及其他杂质入侵。

7) 减振作用

润滑剂可以将冲击振动的机械能转变为液压能，起到阻尼、减振或缓冲作用。

8) 承载作用

作用于摩擦副接触表面的载荷可以通过油膜比较均匀地分布于接触表面。

1.4 固体润滑材料的种类与作用

1.4.1 固体润滑材料的种类

固体润滑材料是指本身具有良好减摩和抗磨损性能的固体材料。通常可以将固体润滑材料划分为固体粉末润滑材料、固体润滑薄膜/涂层和自润滑复合材料等三种类型。

常见的固体粉末润滑材料主要包括石墨及其同素异构体和层间化合物、二硫化化合物 (MoS_2 、 WS_2 、 ZrS_2)、金属氧化物 (Fe_3O_4 、 Al_2O_3 、 PbO)、金属卤化物 (CdCl_2 、 CdI_2)、氮化物 (BN 、 SiN)、硒化物 (NbSe_2 、 WSe_2 、 MoSe_2) 等。

固体润滑薄膜/涂层通常可划分为气相沉积薄膜、电沉积薄膜、化学转换薄膜、黏结涂层 (又称干膜)、热喷涂涂层等，其中气相沉积薄膜和黏结润滑涂层应用得最为广泛^[9,10]。

固体润滑复合材料是指由两种或两种以上具有不同化学性质或不同组织结构的物质以微观或宏观混合形式组合而成的材料。固体润滑复合材料种类繁多，目前尚未形成统一的分类标准。按基体材料可划分为金属基复合材料、聚合物基复合材料、陶瓷基复合材料、石墨基复合材料等；按分散质可划分为纤维增强复合材料、粒子改性复合材料、聚合物-聚合物复合材料等；按复合方式可划分为层叠复合材料、骨架复合材料、粒子复合材料等。其中基于基体材料和分散质材料的分类方法较为常用。

1.4.2 固体润滑材料的作用

利用固体润滑材料能有效地解决高温、高负荷、超低温、超高真空、强辐射、强腐蚀性介质等特殊及苛刻环境工况条件下的摩擦、磨损和润滑防护等问题，简化润滑维修。正因为如此，固体润滑材料是航天、航空、核工业等高新技术领域不可或缺的润滑材料。以下通过实例简要说明固体润滑材料的应用。

装配精密仪器时，在轴芯件表面擦涂少量固体粉末润滑剂可以降低装配难度，避免刮伤和卡死。螺纹等紧固件难以拆卸，在螺丝表面擦涂少量固体粉末，