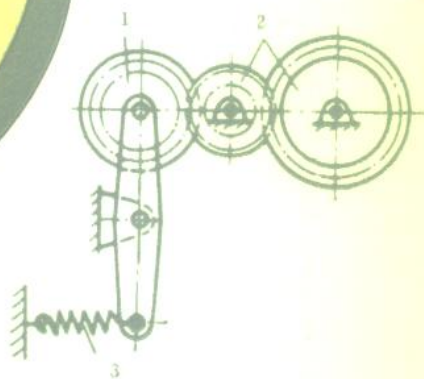
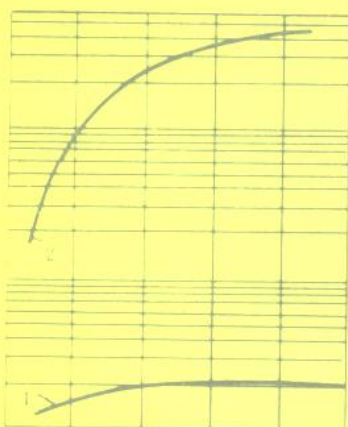


摩擦 磨损

Yu 抗磨技术

编著 张剑锋
周志芳



天津科技翻译出版公司

摩擦磨损与抗磨技术

张剑锋 周志芳 编著

天津科技翻译出版公司

津新登字(90)010号

内容提要

本书简明扼要地介绍了摩擦学的主要内容和基本原理,并着重论述了生产实际中应用的各种抗磨技术。此外,还增加了纺织纤维摩擦磨损与润滑的有关内容。

全书共分十章:第一章绪论;第二章固体的表面性质;第三章固体表面的接触;第四章摩擦;第五章磨损;第六章润滑与润滑剂;第七章耐磨和减摩材料;第八章表面处理;第九章耐磨性设计;第十章磨损实验、监测与失效分析。

本书可供从事机械产品设计、制造、维修、使用和管理人员以及从事摩擦学研究的有关人员参考。并可作为大专院校师生的教学用书。

摩擦磨损与抗磨技术

编 著 张剑锋 周志芳
青仟编辑 青 永 崔乃敏

天津科技翻译出版公司出版

(邮编:300192)

新华书店天津发行所发行

天津开发区怡和企业服务公司激光照排

天津武清印刷厂印刷

* * *

开本 850×1168 1/32 印张:11.5 字数:280(千字)

1993年5月第1版 1993年5月第1次印刷

印数:1~3000册

书号:ISBN 7-5433-0492-9/TB·22

定价:7.80元

前 言

人类的祖先早在公元前 3500 年就对摩擦和磨损现象有了一定的了解,并且知道了用加动物油脂的方法来减少摩擦和降低磨损。此后,从 15 世纪至 19 世纪,世界各国的科学家对摩擦、磨损和润滑陆续进行过很多研究,但由于科技发展水平的限制,这些研究大都是孤立进行的。直到 20 世纪 60 年代人们才将摩擦、磨损和润滑技术作为一门独立的边缘学科加以系统地研究。

众所周知,机器中运动副的相互作用表面在工作时产生相对运动,同时伴随着摩擦,而摩擦会导致摩擦副零件的磨损失效。更换磨损报废的零件则会造成材料的大量损耗,为了节约原材料和能源,减少不必要的浪费,人们通过不断地探索与实践,找到了降低摩擦和磨损的各种对策,例如:润滑剂和添加剂的选用,润滑方法和润滑系统设计的改进;耐磨与减摩材料的应用和新型工程材料的开发以及采用表面耐磨处理技术来改善材料的表面性能等。随着科学技术的发展,各种抗磨技术层出不穷,它对延长机械设备的使用寿命、提高工业产品的质量、降低成本和能耗具有重大的意义。在 1986 年“全国摩擦学工业应用调查报告”中指出:摩擦学技术的推广和应用,可用较少的投资取得巨大的经济效益,其投入产出之比大约为 1:50。

由于摩擦学对国民经济的发展有着巨大的推动作用,因此世界各国都很重视摩擦学的研究工作,并将取得的研究成果应用到生产上。不仅如此,有些国家还十分重视摩擦学的教育与培训工作,出版了大量的摩擦学专著。在高校开设摩擦学课程,并经常举办各种形式的培训班。

为了普及摩擦学的知识,大力推广和应用各种先进的抗磨技术,我们编写了“摩擦磨损与抗磨技术(实用摩擦学)一书,本书的

主要特点是：

- (1)对摩擦学的基本知识和基本原理作了系统地论述；
- (2)介绍了纺织纤维摩擦、磨损与润滑的有关内容；
- (3)着重地叙述了耐磨和减摩材料(如金属、工程塑料、工程陶瓷及复合材料等)的性能及特点,以便工程上选用；
- (4)对提高机械零件耐磨性的各种表面处理技术(如激光表面处理,气相沉积和离子注入等)的特点和应用作了扼要地介绍；
- (5)本书增加了耐磨性设计的有关内容；
- (6)对磨损实验、磨损的监测与零件失效分析的有关内容作了概括的介绍。

本书不仅可作为高等工科院校师生的摩擦学教学参考书,而且对于从事机械设计、维修、管理以及摩擦学研究的广大工程技术人员也具有很大的实用价值。

本书第一、二、三、四、五、六、九、十章是由张剑锋编写的,第七、八章是由周志芳编写的。

本书中有关纺织纤维的摩擦、磨损和润滑的内容,由天津纺织工学院黄淑珍教授审阅;第七、八两章(耐磨、减摩材料及表面处理)由阎毓禾教授审阅;最后全书承天津大学邱宣怀教授主审。在出版本书的过程中得到了天津三峰客车有限公司总经理孙树培的大力支持,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中难免存在不妥之处,恳请广大读者和专家批评指正。

编者 1992.10

主要符号

A	面积	F	载荷,作用力
A_i	一微凸体产生弹性变形时的接触面积	F_f	摩擦力,粘着阻力
A_i'	一微凸体产生塑性变形时的接触面积	F_i	任一微凸体上的载荷,不完全静摩擦力;一对原子的内聚力
A_m	接触点的平均面积	F_i'	使任一微凸体上产生塑性变形时的载荷
A_n	名义接触面积	F_k	动摩擦力
A_p	轮廓接触面积	F_l	完全静摩擦力或极限静摩擦力
A_r	实际接触面积	F_m	平均斥力
A_r'	塑性条件下总的实际接触面积	F_n	法向力,载荷
a	常数,中心距,圆柱体 Hertz 接触区的宽度之半,球体接触区的半径	F_n'	总载荷
a''	粘着系数	F_o	滚动时的驱动力
B	宽度	F_R	滚动摩擦阻力
b	常数,长度	F_s	拉力,分离粘结点所需的力
c	常数,系数	f	摩擦系数
D	直径	f_a	粘着部分的摩擦系数
d	常数,直径,孔径,距离,深度	f_n	逆羊毛鳞片滑动时的摩擦系数
E	弹性模量	f_p	犁沟时的摩擦系数
$^{\circ}E$	Engler 度	f_R	滚动摩擦系数(无量纲)
e	自然对数的底,偏距,表面自由能	$f_{R'}$	滚动摩擦系数(有量纲)

f_s 顺羊毛鳞片滑动时的摩擦系数
 $f(s)$ 用标准偏差单位表示的标准化高度分布
 $f(z)$ 微凸体高度分布的概率密度函数
 $\bar{G}$ 无量纲材料参数
 g_e 弹性参数
 g_v 粘度参数
 H 硬度
 $\bar{H}$ 无量纲膜厚参数
 H_a 磨料的硬度
 HB 布氏硬度
 H_m 金属表面的硬度
 HV 维氏硬度
 HRC 洛氏硬度
 h 高度,油膜厚度
 $\bar{h}$ 无量纲油膜厚度
 h_o 油膜厚度(EHL,中心处)
 h_o' 油膜厚度(流体动压润滑, p_{max} 处)
 Δh 磨损层的厚度,线磨损量
 K 系数,常数,磨损系数,产生磨屑的概率,比例
 K_E 能量磨损度
 K_L 线磨损度
 K_m 常数
 K_v 体积磨损度

K_w 重量磨损度
 k 系数
 L 长度,滑动距离
 l 长度
 l_i 某段长度
 N 行程次数
 n 点数,接触点数,每分钟转数
 n_r 单位面积上微凸体的数目或接触点数
 p 压力,“调整极限”
 p_H Hertz 最大压力
 p_m 平均接触压力
 R 半径,电阻,雷氏粘度
 R_a 表面粗糙度的中线平均值
 R_q 表面粗糙度的均方根值
 R_z 表面粗糙度的最大峰谷高度
 R_x 微观不平度的十点平均高度
 r 半径
 r_R 系数
 S 距离,行程,单位面积上的摩擦力
 S_0 距离,原子间力的作用范围,广义索莫菲尔德数
 T 绝对温度,转矩

T_a 反应温度
 T_c 临界温度
 t 温度,时间
 Δt 时间
 U 速度
 $\bar{U}$ 无量纲速度参数
 V 速度,体积
 V_c 相对滑动速度
 V_i 任一磨屑的体积
 ΔV 磨损体积
 W 功,挠度
 $\bar{W}$ 无量纲载荷参数
 W_r 比磨损量
 ΔW 磨掉的材料重量
 x 坐标轴,指数
 y 坐标轴,距离
 z 坐标轴,高度
 Z_i 轮廓偏差
 α 夹角,系数,粘压指数,百分数,角度
 α_0 系数
 α_k 冲击值
 β 系数,圆心角
 γ 线磨损速度
 δ 变形量,趋近量,位移量,深度,软金属膜厚,延伸率

δ_f 摩擦效应
 δ_i 一个微凸体的变形量
 ϵ 距离,尺寸,相对耐磨性
 η 润滑油的动力粘度,电子密度
 θ 角度,接触角,夹角
 λ 滑动量,位移量,膜厚比
 μ 波桑比
 ν 润滑油的动力粘度
 ρ 密度,摩擦半径
 σ 应力,表面张力,微凸体高度分布曲线的标准偏差
 σ_b 强度极限
 σ_{bb} 抗弯强度极限
 σ_s 屈服极限,屈服压力
 τ 剪切应力
 τ_a 较硬材料的剪切强度
 τ_b 较软材料的剪切强度
 τ_b' 粘结点的剪切强度
 τ_f 边界膜或污染膜的剪切强度
 τ_s 剪切屈服极限
 φ 角度
 ψ 塑性指数,比值
 ω 角速度

目 录

第一章 绪 论	1
第一节 摩擦学的定义及其研究的主要内容	1
第二节 研究摩擦学对国民经济的重要性	2
第三节 在常规大气环境中,摩擦学问题的几种解法	4
第四节 机械设计与摩擦学	6
第二章 固体的表面性质	8
第一节 概 述	8
第二节 固体的表面形貌	8
第三节 表面参数及表面测量	9
第四节 典型表面的组成	19
第五节 表面能与表面吸附	22
第三章 固体表面的接触	28
第一节 概 述	28
第二节 接触面积	29
第三节 赫兹(Hertz)接触	35
第四节 粗糙表面的接触	38
第五节 接触物理和接触化学	45
第四章 摩 擦	50
第一节 概 述	50
第二节 摩擦的分类	51
第三节 古典摩擦定律	53
第四节 干摩擦的机理	58
第五节 影响摩擦系数的主要因素	65
第六节 滑动摩擦的犁沟阻力与粘着阻力	72
第七节 特殊工况下的摩擦	78

第八节	纤维及纱线的摩擦	85
第九节	滚动摩擦	95
第五章	磨损	102
第一节	概 述	102
第二节	磨损的主要类型	102
第三节	磨损过程和磨损的测量	113
第四节	影响磨损的主要因素	118
第五节	当代磨损理论简述	124
第六节	磨损的计算	127
第七节	减少磨损与防止磨损的方法	139
第八节	纤维、纱线和织物的磨损	141
第六章	润滑与润滑剂	150
第一节	概 述	150
第二节	摩擦特性曲线与润滑状态	151
第三节	润滑剂	174
第四节	润滑方法	196
第五节	纤维的润滑	203
第七章	耐磨和减摩材料	208
第一节	金属耐磨材料	209
第二节	金属减摩材料	220
第三节	非金属耐磨、减摩材料	227
第四节	复合材料	240
第五节	耐磨、减摩材料的选择	249
第八章	表面处理	255
第一节	概 述	255
第二节	表面形变强化	256
第三节	表面热处理	258
第四节	激光表面热处理	276

第五节	表面热喷涂技术·····	285
第六节	气相沉积·····	294
第七节	表面电镀和化学镀·····	303
第八节	电刷镀·····	305
第九节	离子注入·····	311
第十节	其它表面处理·····	315
第九章	耐磨性设计·····	319
第一节	概 述·····	319
第二节	摩擦副材料的选择·····	320
第三节	局部品质原则与防护层·····	320
第四节	置换(或转移)原理·····	322
第五节	提高耐磨性的结构设计·····	322
第六节	维护与保养·····	332
第十章	磨损实验、监测与失效分析 ·····	333
第一节	磨损实验与设备·····	333
第二节	机器磨损状况的监测·····	341
第三节	机械零件的磨损失效分析·····	346
	参考文献·····	348

第一章 绪 论

第一节 摩擦学的定义及其研究的主要内容

“摩擦、磨损和润滑”作为一门学科正式提出来是在 1965 年以后,这门学科最后被定名为“摩擦学”(Tribology)。

英文“Tribology”是一个新词,它是由希腊字“Tribos”派生出来的,其含义是“摩擦”。

摩擦学是关于作相对运动的相互作用表面的理论和实践的一门科学技术。

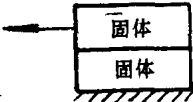
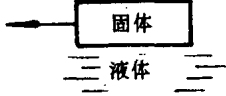
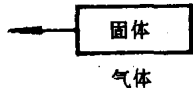
在上述摩擦学的定义中特别强调了摩擦副的“相对运动”与“相互作用”,并明确指出要研究摩擦副的“表面”。摩擦副之间的相对运动可以是滑动、滚动、振动等任何一种形式,或是几种运动形式的组合。其相互作用系指在载荷作用下,两表面发生的各种变化,如弹性变形、塑性变形、粘着和材料的转移等等。

摩擦学定义中所说的“表面”,包括固体与固体,固体与液体以及固体与气体之间的表面(表 1-1),但通常是指固体与固体摩擦副的接触表面,摩擦副两表面的接触包括直接接触和间接接触(例如被流体膜层隔开的情况)。

摩擦学的研究范围十分广泛,其主要内容包括:

- (1)摩擦机理、磨损机理和润滑理论的研究;
- (2)摩擦副的磨损和失效的研究;
- (3)各种润滑剂的性质和作用的研究;
- (4)各种材料和表面处理工艺的摩擦学特性的研究;
- (5)摩擦和磨损理论在生产实际中应用的研究;
- (6)摩擦学测试设备和技术的研究等等。

表 1-1 摩擦副表面的相对运动形式

表面运动	实 例
	轴与普通滑动轴承、火车轮与铁轨
	液压装置的油缸、管道
	空气轴承、汽轮机叶片

研究这些问题要涉及到多种学科的知识,例如流体力学、固体力学、流变学、数学、物理、化学、材料科学、机械工程等等。由此可见,摩擦学已发展成为一门新兴的综合性的边缘学科,它远远超出了机械工程技术人员过去所熟悉的那个范畴。因此,相关学科的专家和技术人员必须团结合作,运用有关学科的最新研究成果,才能促进摩擦学更快的发展。

第二节 研究摩擦学对国民经济的重要性

摩擦和磨损都具有二重性。一方面,它们与人类的生产活动和日常生活有着极为密切的关系。假如在相互作用的表面之间没有摩擦存在,人就不能行走,车辆也无法运动,如果真是这样,那么人类的衣、食、住、行都将成为不可能,换言之,没有摩擦人类就不能生存。

在相互作用的表面之间作相对运动时,一定会伴随着摩擦出现。在机械工程中,如摩擦传动、摩擦离合器、摩擦式制动器和螺纹联接等的可靠性以及各种车辆的运输能力都取决于摩擦的大小。

另一方面,摩擦又是造成能量损耗的原因,据估计,在全世界

工业部门目前所使用的能源中,大约有 $1/3 \sim 1/2$ 最终以各种形式消耗在摩擦上。例如,在美国汽车学会 1956 年年会的有关论文中指出,汽车发动机因摩擦消耗掉其功率的 30%;又如,纺织机械中的摩擦损失居然占了其整个功率的 85%,因此降低了机器的效率。此外,摩擦还可以引起振动和噪音,这些都是有害的。

通常,摩擦会导致磨损,而磨损对人类也有它有利的一面。例如,新机器使用之前的“磨合”磨损显然对延长机器的使用寿命是有益的。为了降低表面的粗糙度对机械零件进行磨削、研磨和抛光等精加工以及刀具的刃磨等也是利用了磨损的原理。但是,磨损可造成机器的早期失效。因为磨损会降低机器的精度和可靠性,因而缩短了它的使用寿命,重要零件的磨损失效会造成停工停产,并可引起突然事故。所以,磨损是机械设备失效的主要原因。

磨损所造成的损失是相当惊人的,据统计,磨损造成的损失是摩擦损失的 12 倍。在失效的机械零件中,大约有 80% 是由于各种形式的磨损造成的。据美国 1977 年的估计,磨损造成的损失相当于国民经济总产值的 12%,即约为 2000 亿美元。由此可知,摩擦引起的能量损耗与磨损所引起的材料消耗在经济上造成了巨大的损失。因此,开展摩擦学的研究(控制摩擦、减少磨损和改善润滑条件等)是非常必要的,以减少或消除不必要的浪费。

实践证明,运用已有的摩擦学知识来解决摩擦、磨损和润滑问题,其经济效益也是巨大的。据 1965 年乔斯特(N. P. Jost)报告的估计,大力开展摩擦学研究,采取减摩和抗磨措施,英国每年可节约 5.15 亿英镑,日本 1974 年节约了 27.3 亿美元,我国 1984 年也作过一次调查,初步结论认为,如果正确运用现有的摩擦学知识,从现在到本世纪末,每年可节约 400 亿元人民币。由此可见,开展摩擦学研究,其潜力是很大的。

对摩擦、磨损和润滑的研究,不仅可以提高机械设备的质量和可靠性,延长机械的使用寿命(据英国有人统计,现在汽车发动机

的寿命较 25 年前已延长了 3 倍),而且还可以提高生产率、降低机械设备的成本和维修费用。

总之,由上述一些粗略估计的数字可以看出,应用摩擦学知识可以节约大量的能源和原材料,这对于国民经济的发展和为人类未来合理利用资源,造福子孙后代,都具有极其重大的意义。

此外,还应指出,近年来摩擦学的研究解决了在真空、高温、低温、辐射以及特殊介质条件下工作的机械的摩擦、磨损和润滑问题,因而促进了航空航天技术、核能技术和海洋开发等高新技术领域的发展;而且还推动了生物力学的发展,例如,人工关节和人工心脏的研究开发工作,已取得了重大进展。

第三节 在常规大气环境中,摩擦学问题的几种解法

我们将常规大气环境中摩擦学问题现有的几种解法,按照图 1-1 的顺序分别加以说明。

(1)干接触

主要用于低速、轻载和要求防止油脂污染的场合,此时应注意选择相容性小的材料副,而且摩擦副中材料之一应具有良好的减摩性和耐磨性。

(2)边界膜

它可以保护摩擦表面,从而减少基体材料的直接接触,可以根据载荷大小、温度和速度的高低,选用不同的边界膜。

(3)固体润滑剂膜

可以采用石墨、二硫化钼等一类层状固体和一氧化铅、氟化钙等无机固体润滑剂以及铟、锡、铅等软金属,它们具有一定的承载能力,而横向剪切强度低,它们主要用于润滑油和润滑脂不能胜任的地方。

(4)流体润滑膜

两摩擦表面可用连续的液体(油、水等)膜或气体(空气、水蒸汽等)膜来隔开。此时,流体膜必须能够产生足够的内压力以平衡外载荷。常见的流体静压轴承和流体动压轴承就是这种解法的例子。前者摩擦系数很小,它可在较大速度范围内(包括 $V=0$)工作而不产生磨损。

(5)弹性体

用弹性体将两表面粘接起来,从而使其隔开,当横向往复运动幅度很小时,这是一种很好的摩擦学解法。常用的弹性体为硫化橡胶或人造弹性材料。

(6)柔性带

将两表面用挠性弹簧片联接起来,其应用条件与(5)相仿。

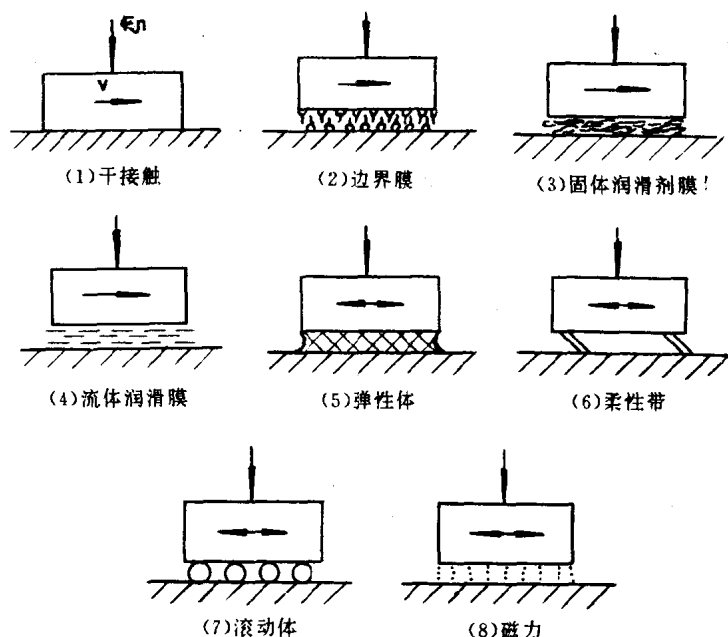


图 1-1 解决摩擦学问题的几种方法

(7)滚动体

在两表面之间放入滚动元件(如球、滚子)是广泛采用的一种摩擦学解法。如滚动轴承就是一例。

(8)磁力

用磁力也可以平衡外载荷,它可使两表面完全隔开而不产生磨损。例如,磁悬浮高速列车,磁力轴承等。磁力轴承可在 500°C 以上的温度下正常工作,其转速高达 $8 \times 10^5 \text{r/min}$ 以上。

在知道了这些解法之后,对于机械设计中的摩擦学问题,我们就可以根据载荷、速度、周围环境条件以及摩擦和磨损的限制条件等因素,找到最合理的解决方案。

第四节 机械设计与摩擦学

尽管摩擦学问题普遍地大量地存在于所有的机械设备中,但是过去在机器的设计阶段很少有人全面地考虑这方面的问题。例如,在设计新机器时,设计人员一定会对其中最重要的零部件进行强度计算,然而对其耐磨性往往考虑不周,正是因为在设计一开始就未全面考虑摩擦学问题,因而机械的性能往往达不到设计要求。例如,某一牌号的轿车,其发动机的性能很好,变速箱的质量也很高,但是由于润滑油选择不当,而使变速箱齿轮经常出现胶合,因此不能高速行驶。

常常会出现这样的情况,当新机器设计制造出来以后,在使用过程中才发现一系列的摩擦学方面的问题。这时才开始考虑采用那些摩擦学措施来加以补救,但为时已晚。更有甚者,在问题出现之后,仍然不知道如何采取最有效的摩擦学措施来处置这些问题,而造成巨大的经济损失。

随着摩擦学知识的普及,人们现在对于它在机械设计中的重要性的认识越来越深刻了,摩擦学不仅对提高现代机械产品的质量、生产效率和可靠性(现代机器的可靠性要求在 $7 \sim 10$ 年内达到 99% 以上)具有重要意义,而且对延长机器的使用寿命,节约大量