

摩 擦 学

—摩擦、润滑及磨损的科学技术

〔日〕松原清

李明怀 庄志译

黄文治校



西安交通大学出版社

摩 擦 学

——摩擦、润滑及磨损的科学技术——

〔日〕 松 原 清

李明怀 庄 志 译

黄 文 治 校

西安交通大学出版社

内 容 提 要

本书由日本摩擦学界颇有影响的人士之一、日本东海大学松原清教授编著,在内容的遴选和章节的安排上别具新意。

全书共分十章。第一章“绪论”,说明了摩擦学的概况;第二章“粘附”着重介绍了粘附现象及有关的实验、研究结论;第三、四、五、六章叙述了“滑动摩擦”、“磨损”、“滚动摩擦”、“边界摩擦”的基础理论;第七章“高分子材料摩擦学”全面地分析了此类材料的摩擦、磨损机理;第八章“速度论与摩擦学”讨论了化学反应(包括氧化)而引起的磨损情况及化学反应速度与活化能的关系;第九章“滑动摩擦的测量”介绍了测量滑动摩擦的一些基本方法;第十章“最新的研究”则综述了80年代初摩擦学某些分支的研究发展情况。

本书是以大学生和研究生作为主要对象,并为培训摩擦学技术人员的需要而编写的教学用书,亦可供从事摩擦、磨损和润滑的研究人员及工程技术人员参考。

摩 擦 学

——摩擦、润滑及磨损的科学技术

〔日〕松原清

李明怀 庄志译

黄·文·治·校

责任编辑, 胡刚

西安交通大学出版社出版

(西安市咸宁路28号)

西安市双桥头印刷厂印装

陕西省新华书店发行 各地新华书店经售

开本787×1092 1/32 印张12.375 字数261千字

1987年10月第1版 1988年4月第1次印刷

印数: 1—2000册

ISBN7-5605-0042-0/TH·2 定价: 2.25元

译 序

摩擦学是一门新兴的边缘科学，虽然它的形成始于60年代，但由于它对国民经济与科学技术的发展具有极其重要的意义，从而引起了各方面的重视，得到了迅速发展。许多机械设计与生产中的实际问题亦正在逐步应用摩擦学加以解决。目前，国内许多高等院校均有专人对摩擦学进行研究，有的已对本科生开设了摩擦学课程，有的还招收了摩擦学研究生。在教学活动中，大家都希望能有一本适于高校教学的参考资料。为此，我们翻译了日本松原清教授按执教讲义所编写的“摩擦学”，但愿它对高校开设摩擦学课程有所裨益；亦望它能为从事摩擦学研究和应用方面的有关专业人员的学习创造条件。

本书第一、二、九、十章由庄志翻译，第三、四、五、六、七、八章由李明怀翻译。由于摩擦学是一门跨学科的技术科学，所涉及的范围相当广泛，限于译者水平，译文中难免有欠妥以至谬误之处，恳请读者予以指正。

在翻译过程中，承蒙我院原院长、中国机械工程学会摩擦学学会常务理事暨教育与培训委员会主任黄文治教授审校译稿；西安交大的吴寿镒、叶应清两同志对翻译、出版工作给予了极大的支持和帮助；在此，向他们致以衷心的感谢。

译 者

1985年3月
于武汉工学院

原 序

摩擦学(tribology)是一门研究有关摩擦、磨损和润滑的技术科学。因而，可以说它既是一门与机械工业等多种行业有关的学科，又是一门涉及很多科学领域的基础科学。

就摩擦学的内容而言，它涉及许多复杂而又难以理解的现象；诸如，坚硬的淬火钢与柔软的橡胶，在磨料磨损现象中具有同等水平的耐磨性；白合金用于棘爪会产生裂纹，但历来却把它作为优质轴承材料使用。

面对大学本科生和专科生，此书在讲解具有上述特点的摩擦学内容时，着重于基础，以通俗易懂的方式进行阐述；同时，还努力使其内容自成体系，诚如第五章滚动摩擦那样，根据需要作了专门、深入的论述。

昭和50年前后，本人曾在日本工业技术院机械研究所及东海大学从事摩擦学的研究工作。在执教于东京农业大学、东海大学工学院及同大学院机械工程专科时，曾以科研内容为主，编写了一本讲义。本书则是以此讲义为基础写成的，但在内容上已考虑了摩擦学的发展情况，以及对培养摩擦学专门人才的要求。如果本书还能供一般研究工作者及技术人员参考，则更是值得高兴的了！

本书之得以出版，有赖于日本润滑学会许多前辈的指导，并承允许引用了他们的大量科研成果。为此，对他们表示衷心的感谢！在本书出版过程中，曾得到产业图书公司及该编辑部户崎胜义先生的鼎力相助，在此深表谢意。

昭和56年10月 松原 清

目 录

1. 概 论

1.1 前 言	1
1.2 摩擦学概述	2
1.3 滑动面的温度与表面现象	14
1.4 粗糙度	17
参考文献	20

2. 粘 着

2.1 滑动摩擦与粘着	24
2.2 粘着实验	26
2.3 粘着与磨损	31
2.4 金属薄膜的粘着	34
2.5 橡胶的粘着	35
参考文献	39

3. 滑动摩擦

3.1 摩擦定律	41
3.2 接触形式与摩擦定律	43
3.3 粗糙度与摩擦的关系	53
3.4 粘弹性与摩擦	58
3.5 滑动摩擦和滚动摩擦	64
参考文献	66

4. 磨 损

4.1 粘着磨损	70
4.2 不光滑磨损	79

4.3	疲劳磨损	90
4.4	材料的其它磨损特性	95
	参考文献	110
5. 滚动摩擦		
5.1	滚动摩擦的测量方法	114
5.2	影响滚动摩擦的因素	132
5.3	滚动摩擦现象及其机理	154
	参考文献	173
6. 边界摩擦		
6.1	边界摩擦及其范围	177
6.2	流体润滑与EHL	180
6.3	边界润滑理论	183
6.4	边界摩擦中的各种现象	187
6.5	边界摩擦情况下添加剂的效果	200
	参考文献	217
7. 高分子摩擦学		
7.1	高分子的粘弹性	220
7.2	高分子的摩擦	225
7.3	高分子的磨损	243
7.4	滚动摩擦——粘弹性体理论	258
7.5	润滑特性	272
	参考文献	280
8. 速度论与摩擦学		
8.1	反应速度论与活化能	286
8.2	分子吸附的活化能	287
8.3	化学反应	300
8.4	粘性流动	305
8.5	磨损	309

8.6	摩擦学中的活化能	314
	参考文献	317
9.	滑动摩擦的测定	
9.1	表面净化与试验机的固有频率	320
9.2	测定值的可靠性与再现性	322
9.3	试验机及测定方法	326
	参考文献	343
10.	最新研究成果	
10.1	前言	343
10.2	摩擦	348
10.3	磨损	354
10.4	磨粒磨损	358
10.5	高分子材料	368
10.6	耐磨表面的处理	376
10.7	滚动摩擦	382
	参考文献	384
	索引	386

1. 概 论

1.1 前 言

人类为了高效率地移动或搬运物体，自古以来一直在利用“滚动”^[1]。无论是陆地、还是水上，低摩擦而高效率地移动物体，可以说在人类的文明史上始终起着重要的作用。如果将各种运动形式数值化，滑动摩擦系数是 $\mu_s=0.1-0.5$ ，滚动摩擦系数是 $\mu_R=0.001-0.05$ ，滑动轴承的摩擦系数是 $\mu_B=0.001-0.01$ （均为概略值），用这些数字可以定量地分析各类运动的效率。

在普遍使用机器的文明社会里，用机械来传递动力或传递运动，零部件之间的相互运转，是既有滑动又有滚动的。因而，若不考虑摩擦、磨损、润滑这一重要课题，就不能充分发挥机械的效能。特别是在飞机、电气列车、汽车等大量运输机器中，润滑学是非常重要的，如果发生了象运动付烧伤之类的故障，将直接关系到人们的生命安全。

试看宇航员在月球表面跳跃步行的样子就会明白，在太空中操纵机械，润滑是一项极为困难的技术。因为太空处于超高真空状态，其真空度为 10^{-19} torr数量级^[2]。在这种条件下，润滑油或润滑脂之类的润滑剂，不管液体或固体都有被蒸发的可能，因而成为烧伤的原因。

不仅是在象太空技术、海洋开发这些包含大量科学技术的领域，即令在我们的日常生活中，涉及摩擦及润滑的内容亦是饶有趣味的。而且，一些未知的现象已为人们所注意。例如，为什么可以进行滑冰、滑雪之类的运动？为什么雨淋湿的路面容易滑倒，要说明这些问题，原理必须有普遍性，与原理不一致的现象就应该进行充分地研究。

在我们的研究范围内，常常是将摩擦、磨损、润滑、材料类别或机械零件等按各自的内容来加以划分的。然而，这些内容之间很多是相互关联的，为了促进相近学科的知识交流和便于研究，倒不如不必细分为好。形成“摩擦学”(tribology)这一新术语的理由，恐怕就在于此。关于摩擦学这一术语的来源，曾田^[8]有过详细的说明。若按OECD的术语及定义，所谓摩擦学，是研究作相对运动的相互作用表面，以及与之有关的实际应用的一门科学与技术(Tribology is the science and technology of interacting surfaces in relative motion and of the practices related thereto)。

正如在机械工程手册(第6版)第7篇5.1节中强调指出的。摩擦学的发展及其普及效果，是以希望达到节能、节省资源的经济效益为基础的。

1.2 摩擦学概述

本书的内容在以后各章均有专门阐述，这里仅叙述各章的概要，打算指出各章内容的关键与难点。通过学习本节内容，增进对摩擦学的理解和兴趣，进而概括全书各章的内

容。

1.2.1 粘着

从词义上看，**粘着** (adhesion) 与**胶合** (cohesion) 是有所不同的，前者是指不同材料间的粘附 (ad-)，后者可看成是同一材料的胶合 (co-)。胶合一般是指作用在原子、离子或分子间的凝聚力，狭义的说是指包括范德瓦尔斯力在内的二次结合力，通常它是以液体或气体为对象的。与此相应，粘着通常是以包含固体间的一次结合力和二次结合力为对象的。因而，也能用粘着 (胶着) 的意义来取代，但这个词，多以含有粘着剂的物质为对象。

粘着是贯穿于摩擦学中所有章节的基本概念。例如，为说明与摩擦有关的下述定律：摩擦力与名义表面积无关，而与载荷成正比，可认为摩擦力是因表面微凸体间真实接触部位的粘着所引起的。它与表面粗糙度的概念相对应，可称之为“凹凸论” (roughness theory) 或“粘着论” (adhesion theory)。另外，将与摩擦具有相同机理的磨损，称为“粘着磨损” (adhesion wear)，以便与因微粒或粗糙面产生的磨损，即磨粒磨损 (abrasion) 相对应。

因为产生粘着的机理，不仅与固体的结构或物质存在的基本内容有关，也牵涉到化学结合律。所以，要解释它将非常困难。Buckley^[4]试图用结合材料的电子排列来说明粘着实验，但是失败了。松原注意了这个动向，并将它作为粘着电子论而加以介绍^[5]。其后，Sargent^[6]对这个问题做了进一步的详细研究。他把粘着解释为：如果在原子的外壳电子层中，s 亚层或 p 亚层缺少电子，它将显示出高的自身粘着倾向，这就是电子论。

1.2.2 滑动摩擦

滑动摩擦，遵循摩擦力与名义表面积无关，而与载荷成正比的所谓库仑法则^[7]。它的解释是，就象焊锡的附着那样在真实接触面上引起粘着。并设想，在这个粘着面上的剪切力就是摩擦力。如果存在着这样的粘着面，就不仅仅是摩擦方向上的摩擦力，但为什么不观测在摩擦力垂直方向——即重力方向的力（粘着力）呢？当然这是一个问题。关于这一点，即令在对粘着的研究已取得相当进展的今天，可以说还是不很清楚的！

粗糙度对于滑动摩擦的影响是非常复杂的，若在粗糙度的模型中设底角为 θ ，测量与 μ 有关系的 $\text{tg}\theta$ 值，由于 μ 值与 $\text{tg}\theta$ 成正比，因而 μ 值有大，有小。但若从摩擦功的整体来考察，粗糙度的影响，则大约在10%以下。

影响滑动摩擦的因素，可看成是粘着、粗糙度、滞后损失等各种影响的总和，但 Ernst、Merchant^[8]认为粘着及粗糙度是主要因素，并写出下式

$$\mu = S/H + \text{tg}\theta \quad (1.1)$$

式中， S/H 是基于粘着论， $\text{tg}\theta$ 是基于凹凸论。

当考虑到滑动摩擦对于真实接触的影响时，由于其塑性的或弹性的接触形态，决定了摩擦力的载荷性质。这在分析法则时是一项重要内容。即在说明金属、橡胶、塑料等的摩擦情况时是很重要的。

1.2.3 磨损

与摩擦的法则相对应，也有粘着磨损的法则。此法则能用与摩擦法则相同的机理来说明，即单位磨损量与名义表面积无关，而与载荷成正比。但是，该法则成立的必要条件

是，滑动面的物理性质状态自始至终没有变化。假如滑动面上有氧化层生成，即滑动面的物理性质状态起了变化，则将破坏法则的一贯性。

磨粒磨损对于材料硬度是非常敏感的。一般认为，耐磨损性与硬度有大致比例关系(图4.11)。可是对于碳素钢，若采用热处理使硬度变化，则比磨损量与硬度已不符合线性关系。对于这个现象，Torrance^[9]是以承载试件具有一般的弹性变形和附加塑性变形来解释的，从而导出了一个一般关系式(式10.26)。这个理论式与实验情况非常吻合。

在滚动轴承及齿轮廓面上有时产生点状的磨损，这就是表面**疲劳磨损**(surface fatigue wear)。在平面与球接触时，平面内部剪切应力的最大值 τ_{max} 与垂直最大应力 p_m 的关系是 $\tau_{max}=0.47p_m$ ，若接触圆半径为 a ，其磨损深度为 $Z=0.6a$ 。对于圆柱(或称为圆筒)与圆柱轴线平行的接触，其磨损深度为 $Z=0.78a$ (图4.22)。由于疲劳磨损受剪切应力的支配，重要的是取最大剪切应力处的磨损深度作为点状磨损深度的尺度。

1.2.4 滚动摩擦

滚动摩擦系数与滑动摩擦系数相比，只有它的1/100。造成这种原因的机理，研究起来是很有趣味的。

滚动摩擦的机理有粘着论、粗糙度论、弹性滞后损失论等等。弹性滞后损失论最初是由久田^[10]提出的，后来由Tabor^[11]进行了系统的研究。例如，刚性圆球在平面上滚动，考查其平面方向的应力和变形曲线时，两者之间不呈直线关系，而可以用一条滞后曲线进行描述。这种损失是基于材料的内摩擦，它主要变成了热。这种弹性滞后损失从全局上看是起

支配作用的，但由于条件不同，粗糙度论或粘着论有时也处于优先地位。

在1785年，库仑提出了有关滚动摩擦的库仑定律。他指出：滚动摩擦力 F 与载荷 W 成正比，与直径 D 成反比。具体表达式如下

$$F = kW^n D^m \quad (1.2)$$

在库仑定律中， $m = -1$ ； $n = 1$ 。对 m 值，根据后来的研究，有 $m = -1/2$ （Dupuit式）； $m = -1$ （Tabor等人^[12]，适用于塑性范围）； $m = -5/3$ （Tabor^[11]，适用于弹性范围）； $m = 1/2$ （久田等人^[13]）。特别是久田的数据为正值。上述这些 m 值大部分是根据振子式求得的，而久田是根据摩擦的自由衰减曲线将摩擦分为干摩擦*与粘性摩擦两部分，并对两者加以区别，而 $m = 1/2$ 正反映了干摩擦部分，应与其他值不同。

1.2.5 边界摩擦、液体润滑及弹性流体润滑

a. 索莫菲尔德参数与摩擦系数

摩擦系数 μ 和 $\eta N/p$ 的关系，详细的说，是 $\mu(d/c)$ 和索莫菲尔德参数 $S[(d/c)^2 \eta(N/p)]$ 的关系。在 S 从0.001增加到0.1时， $\mu(d/c)$ 逐渐下降。而在 $S = 0.1$ 时， $\mu(d/c)$ 取得最小值， $\mu(d/c) = 7-8$ 左右。若 $S > 0.1$ ， $\mu(d/c)$ 重新增大。这种关系如图6-4所示。很清楚， $S < 0.1$ 是边界摩擦的范围， $S > 0.1$ 是流体摩擦的范围。在分析 $S < 0.1$ 的情况时，对于 $\eta N/p$ 中的各单一因素若 η 、 N 小或 p 大，使它们的乘积 $\eta N/p$ 值减小，就成为边界摩擦的条件。由于在这种条件下伴随有固体接触，它是出现各种故障的原因。在 $S > 0.1$ 之

* 原文为固体摩擦。——译注

上， μ 值之所以增加，其首要原因是粘性阻力增加。将上述规律简化，可以表示成图1.1所示的曲线。

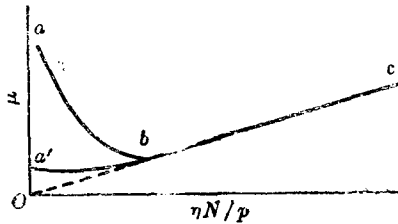


图 1.1 μ 和 $\eta N/p$ 的关系

b. 单分子膜的制作

与边界摩擦的研究相联系，有在固体表面生成液体单分子膜的Langmuir-Blodgett法，如图1.2所示^[14]。单分子液体浮在水面上，根据隔棒的移动，记录表面张力。其横坐标表示距离，纵坐标表示表面张力。由曲线的变化很容易看出单分子密集填充的极限状态，以及由单分子膜向二分子膜变化的情况。为了形成必要的单分子膜状态，需要将单分子液体涂抹在由玻璃等制成的固体表面上，以供实验。

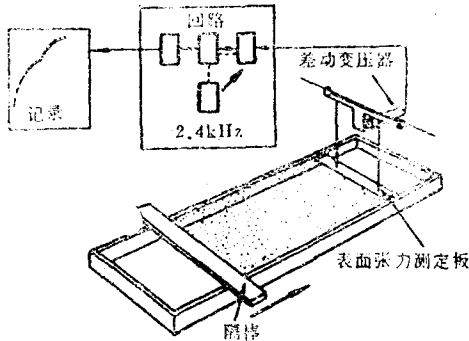


图 1.2 Langmuir-Blodgett 法(Müller等^[14])

Müller等人^[14]就是使用的如图1.2所示的装置。这项实验是在0.1mol的NaCl水溶液中加入适量的NaOH，作成pH值可变的试液，来测定面积和表面张力的关系，将其结果画在图1.3上。由这些实验结果可以说明，两者之间起作用的主要原因，是NaCl造成的磷酸离子化。

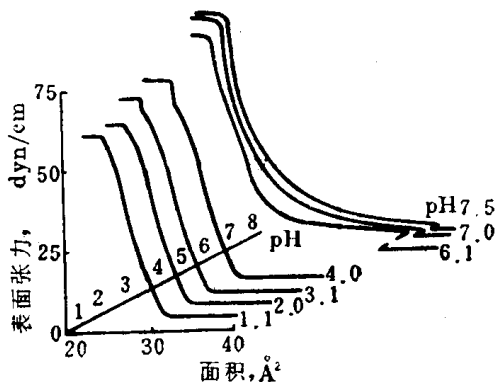


图 1.3 0.1mol NaCl 上的十六烷磷酸脂单分子膜的表张力面积的关系^[14]

c 固体表面液滴的接触

在固体上放置一滴液体，测定接触角为 θ ，如图1.4所示。力的平衡式如下

$$\gamma_{SV}^{\circ} - \gamma_{SL}^{\circ} = \gamma_{LV}^{\circ} \cos\theta \quad (1.3)$$

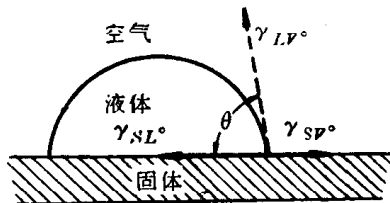


图 1.4 接触角

这就是被称为young的公式。式中注脚 S 、 V° 及 L° 分别表示固体,空气及液体。例如, γ_{SL}° 是固体和液体间的表面能。如果空气和固体间的表面能 γ_{SV}° 增大,则 θ 减少。一般可以用 θ 作为 γ_{SV}° 的尺度,来研究摩擦系数和 θ 的关系等。另外,以接触角 θ 为0的表面张力作为固体表面能 γ_s ,来研究它和摩擦的关系(图7.5)。

d. 介于固体间的液体

使用具有光学光滑面的金属和玻璃模型,对橡胶球加热和加硫,使球的表面十分光滑。将这种加工过的球按压在玻璃板上,能显示出清楚的牛顿环。很明显,橡胶球的尺寸精度要求很高。

橡胶球的表面是具有数百 \AA 数量级微凸体的光学光滑面,如果配对物是非常好的光滑面,就可以以分子的尺度研究接触面接触的情况。

这时,在橡胶球和玻璃面之间注入粘性油,沿橡胶球的垂直方向加上一定的载荷,在球的垂直方向附近,用光干涉法测定油膜厚度随时间的变化(图1.5)。在这项试验中,使用了粘性系数非常高的硅油,测定中心部位接触的状况和干涉条纹的变化。测定所经历的时间,在5分钟($t=288\text{S}$)到80小时之间变化。另外,单色光使用钠光,测量接近状况的单位用 \AA 。若使用蒸馏水取代油,由于形如碗状的液膜的生成与破坏很快,观测很困难。

和田等人^[17]用镀银的环氧树脂圆柱(直径大约113mm,宽3.1mm)取代上述橡胶球,进行和上述同样的试验。以向中央的接近速度代替接触所经历的时间,整理成图形。可观测到形如碗状的润滑油的径迹(图1.6)。另外,还有使用直