

磨损

日本润滑学会编 霍庶辉译

MO SUN

中国铁道
出版社

磨损

日本润滑学会 编 霍庶辉 译

中国铁道出版社

1985年·北京

昭和53年度入門講座

摩 耗
教 材

社団法人 日本潤滑学会

※ ※ ※

磨 損

日本潤滑学会編

霍 庶 輝 译

中国铁道出版社出版

责任编辑 王雪芬 封面设计 王毓平

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092 $\frac{1}{2}$ 印张：4.875 字数：106千

1985年2月第1版第1次印刷

印数：0001—6,000册 定价：0.90元

内 容 提 要

这是一本介绍摩擦、磨损及润滑基本知识的书。内容简明，通俗易懂，主要有：摩擦、磨损与润滑的基本理论及其检测方法；耐磨材料与表面处理；润滑剂对磨损的影响；润滑油中固体夹杂物的测定与分析等。

目 录

一、摩擦、磨损与润滑	曾田範宗 (理化研究所) ... 1
(一) 前 言	1
(二) 摩擦研究的历史	2
(三) 摩擦的三种状态及其定律	3
(四) 干摩擦 (固体润滑)	6
(五) 边界摩擦 (边界润滑)	8
(六) 流体摩擦 (流体润滑)	12
(七) 摩擦的三种状态与磨损	13
(八) 润滑表面的摩擦与磨损	15
(九) 润滑膜的破裂	18
二、边界润滑	岡部 平八郎 (东京工业大学) ... 22
(一) 边界润滑状态 (1)	22
(二) 边界润滑状态 (2)	24
(三) 吸附与边界润滑	30
(四) 在边界润滑面上发生的化学反应	32
(五) 边界润滑状态中的润滑失效	34
三、磨损的分类与磨损特性	築添正 (大阪大学) ... 35
(一) 前 言	35
(二) 磨损的形态	36
(三) 磨损现象的复杂性	40
(四) 摩擦与磨损	41
(五) 粘附磨损	43
(六) 磨粒磨损	46
(七) 腐蚀磨损	49
(八) 疲劳磨损	49
四、磨损机理的变迁与现状	笹田直 (东京工业大学) ... 53
(一) 前 言	53
(二) “犁沟”理论	54

(三) “粘附磨损”理论	59	
(四) “疲劳”理论	61	
(五) 鲍维尔关于磨损的分类——1957年	63	
(六) 三种基本作用的对立与统一	65	
(七) 直接观察磨屑的产生过程	67	
五、耐磨材料与表面处理		
..... 竹内栄一 (东京都立工业技术中心)	71	
(一) 前 言	71	
(二) 表面硬度与耐磨性	72	
(三) 控制粘附现象的表面处理与耐磨性	76	
六、润滑剂对磨损的影响	星野道男 (三菱石油)	88
(一) 润滑剂的作用	88	
(二) 磨损的控制与磨合	88	
(三) 润滑剂的形态与磨损的控制	92	
(四) 润滑剂的物理性质与磨损	93	
(五) 润滑剂的化学性质与磨损	101	
(六) 各种润滑剂对防止磨损的作用	112	
七、油中固体夹杂物的分析与测定	酒井和男 (日本石油)	115
(一) 前 言	115	
(二) 润滑油中固体夹杂物数量的测定	116	
(三) 润滑油中固体夹杂物成分的分析	123	
八、磨损试验条件的选择方法		
..... 津谷裕子 (机械技术研究所)	134	
(一) 前 言	134	
(二) 磨损试验机	135	
(三) 测定磨损的方法	147	
(四) 按目的要求决定磨损试验条件的方法	148	

一、摩擦、磨损与润滑

理化研究所 曾田範宗

(一) 前 言

摩擦、磨损这种现象，在工程上并非总是有害的。机车车辆的制动装置，就是利用其较大的摩擦力，而研磨与抛光等工序，则是以磨去对方材料为目的的过程。有时，甚至添加润滑剂也是以促进其磨损为目的。研磨剂与抛光剂的作用，就是属于这种情况。压力焊与摩擦焊等新技术，也是利用结合面之间的很大的摩擦力来实现的。

然而，以上所列举的，不过是技术方面的特例而已。一般各种工程中的摩擦，使能量消耗有所增加，并且摩擦热常常是造成烧伤的原因。另一方面，由于磨损而缩短了机器的使用期限，使高精度的机器过早地出现松动等现象，因此，从某种意义上来说，摩擦与磨损是技术工作者的仇敌。解决这类问题的科学和技术，通常称为润滑或润滑技术。

最近，在英国出现了摩擦学 (tribology) 一词。暂且不讨论这个难于理解的定义，但它是摩擦、磨损与润滑等方面所共有的全部科学与技术的总称，它比狭义的润滑包括了更为广泛的领域。摩擦学是以节约资源、节省能源、降低成本等近代的课题为背景，提高摩擦与润滑的科学与技术水平，被认为具有整个社会性的重大的意义。

摩擦、磨损与润滑，包括了科学和技术的极其广泛的专业领域，它涉及到机械工程学、物理学、化学、金属学等学

科。从它们各自不同的角度出发，详细的说明留给后面讲述，在此仅就摩擦、磨损与润滑问题的相互关系，做些初步的论述，作为绪论。

（二）摩擦研究的历史

关于摩擦现象的研究，始于十五世纪后半期意大利的利奥纳多·达·芬奇。这既是由于他的天才而进行了这方面的研究工作，也是由于当时的造船、建筑等新技术的发展而产生的必然结果。利奥纳多认为固体的摩擦系数为其本身重量的四分之一，而且在他的笔记中，已经推导出今天的摩擦系数的概念（用摩擦力与正压力之比来表示）。后来，库仑的摩擦定律，事实上把利奥纳多的观点全部承认下来了，同时引伸出了滚动摩擦与磨损的概念。

自从利奥纳多起两世纪之后，摩擦方面的研究，在法国首先由阿蒙顿继承下来了。当时的法国，各种工业尤其是面粉业、钟表业及其他工业，在欧洲是最兴盛的。作为提高机器的耐久性与使用性能的一个环节，摩擦问题的研究正处于方兴未艾之际。十八世纪后半期，以阿蒙顿为首的，德·拉·西尔和帕朗等著名的研究工作者问世了。帕朗建立了摩擦角的概念，从而把静摩擦力成功地纳入静力学之中。摩擦定律大体上是由阿蒙顿与西尔完成的，对摩擦定律的说明，基本上也是以凹凸理论来解释的。关于润滑的影响，当时就已经着手研究了。

从那时起大约经过一百年，库仑用极其系统的试验完善了今天的摩擦定律，但是，其内容与阿蒙顿、西尔相比较，并没有特殊的进展。

从十九世纪到二十世纪初期，与其说摩擦的粘附理论否定了凹凸理论，不如说是扬弃皆有而大大地普及和发展起来

了。然而，粘附理论的萌芽在十八世纪就产生了。今天的粘附理论是以两个重要概念为前题的。其一，摩擦面的接触不等于名义的表面相接触，而只有凹凸的一部分（微凸体部分）才真正地接触，这个概念是由西尔最先提出的。其二，认为凹凸部分对摩擦的影响仅占有次要的作用，摩擦的真正原因是由英国的德萨古利埃提出的分子间的引力引起的。这个学说在当时几乎无人过问，但是，不久到了十九世纪的末期，哈迪、托姆林森等人的分子力学说，作为更进一步的粘附理论，在英国发展起来了。这样，今天的摩擦理论，是以接触现象与粘附现象的试验研究为基础，并且基本上是在英国建立起来的。

(三) 摩擦的三种状态及其定律

摩擦的状态，大致可分为下列三种：

1. 干摩擦；
2. 边界摩擦；
3. 流体摩擦。

下面就各种摩擦的性质及有关的定律，做一简要说明。

1. 干摩擦（图 1--1）

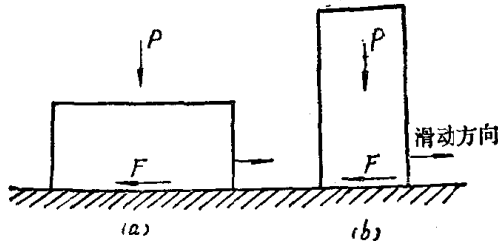


图 1—1 干摩擦（两者名义接触面积不同而摩擦力相等）

干摩擦是指没有任何污染的固体与固体之间的摩擦。这种污染系指摩擦面上的吸附物，例如，薄的油膜，氧或水分的薄膜，以及其他非固体的第三种物质的薄膜等。

在这种情况下，库仑的摩擦定律基本上是成立的。因为

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

$$\therefore \mu = \frac{F}{P} \quad (1-1')$$

式中 F ——摩擦力；

P ——垂直载荷；

μ ——称为摩擦系数的比例常数。

F 与名义接触面积及滑动速度几乎无关，但是，现在经常提到的，库仑第三定律中的静摩擦力大于动摩擦力，对于摩擦来说就不一定成立了，也就是说，在非常洁净的表面上干摩擦，静摩擦力与动摩擦力几乎是相等的。

在大气之中，真正的干摩擦是难以实现的，我们所说的“大气中的干摩擦”，是指容许吸收大气中一定数量的气体的条件下，仍把它称为干摩擦而言。

干摩擦时的摩擦系数 μ ，大致在0.1~1的范围内。

2. 边界摩擦

边界摩擦是指摩擦面上具有极薄的液体或气体的吸附膜时的摩擦。这时，库仑定律基本上仍然成立，然而，在一般情况下，正象库仑所指出的：

$$F = A + \mu_1 P \quad (1-2)$$

A 是决定于吸附物的性质与厚度的常数， A 值较小时，事实上与(1-1)式相同。根据公式(1-2)，一般，边界摩擦时的摩擦系数 μ 为：

$$\mu = \mu_1 + \frac{A}{P} \quad (1-2')$$

边界摩擦系数的大小，通常在 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ 范围内。边界摩擦时吸附膜的厚度，最好在 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ mm之间。

3. 流体摩擦 (图 1-2)

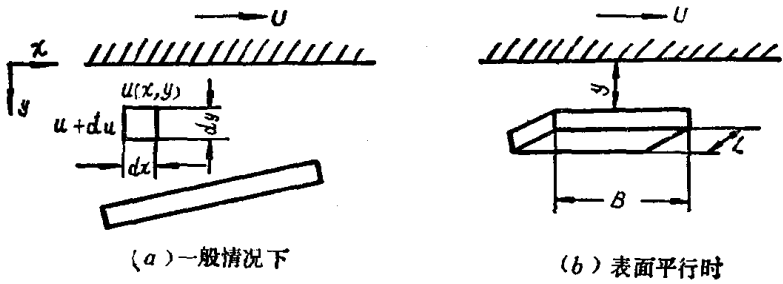


图 1—2 流体摩擦

在固体表面之间夹有流体（液体或气体），而且，当流体膜的厚度较大时的摩擦，即为流体摩擦。这时，摩擦发生于流体膜的内部，由牛顿的粘性阻力公式得出：

一般情况下

$$\tau = \eta \frac{du}{dy} \quad (1-3)$$

表面平行时

$$\tau = \eta \frac{U}{h} \quad (1-3')$$

$$F = \eta \frac{UA}{h} \quad (1-4)$$

- 其中 τ ——单位面积上的摩擦应力；
 F ——摩擦力；
 η ——与粘度系数同因次的比例常数（按 CGS 制单位为 $\text{kgf} \cdot \text{s} / \text{m}^2$ ）；
 u ——流速；
 U ——滑动速度；
 h ——油膜厚度；
 A ——摩擦面的面积。

$$\therefore \mu = \frac{F}{P} = \frac{\eta U}{h} \frac{LB}{P}$$

$$= \left\{ \frac{\eta U}{P/L} \right\} \left(\frac{B}{h} \right) = \left(\frac{\eta U}{P_1} \right) \left(\frac{B}{h} \right)^* \quad (1-5)$$

这里的 μ 是流体摩擦时的摩擦系数，它与库仑的摩擦系数不同， μ 值与决定摩擦条件的无因次量 $\eta U/P_1$ 成正比（ P_1 为单位宽度上的载荷）。

由于流体摩擦系数与 ηU 成正比，其数值可在很小的值到非常大的值之间，而对于一般的轴承来说，在实际运用的条件下为 $10^{-2} \sim 10^{-8}$ 。

(四) 干摩擦 (固体润滑)

使两个表面洁净的固体相互接触，或在表面上有一定污染的情况下，把两者强力地压在一起，则在整个的接触部分或局部的接触面上，会出现原子之间的接近，从而发生强而有力的分子之间、原子之间的结合（粘附）。在此状态下使其剪断时，则在结合部分（粘附部位）出现了剪断的阻力，这就是摩擦力（图 1—3）。十八世纪的末期，以库仑为代表的凹凸理论这一派，认为摩擦的原因不是因剪断粘附部位而形成的，主要是由于凹凸的啮合部分，在突出的峰顶上使其上下滑动而消耗能量的结果（图 1—4）。但是，本世纪

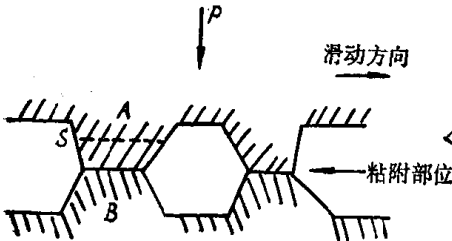


图 1—3 粘附摩擦的模型

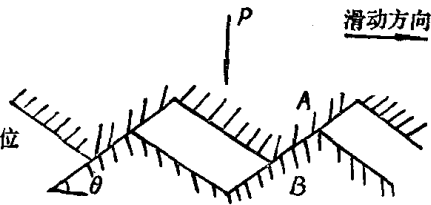


图 1—4 凹凸摩擦的模型

* 对于实际的轴承表面来说，由于 P_1 与 B/h 有关，使公式（1—5）的第 2 项更为复杂〔参照（六）〕。

的初期，哈迪认为凹凸的形状几乎没有影响。例如，只要具有单分子层厚的油膜，则摩擦力就会显著地降低；如果把摩擦面光整到某种程度以上，而摩擦力反而增大。由于这种实际情况的发现，而立即支持前一种观点，即增强了粘附理论的依据。当前，粘附理论基本上成为一种决定性的学说。

根据凹凸理论，摩擦系数 μ 用众所周知的下列公式来表示，即

$$\mu = \operatorname{tg} \theta \quad (1-6)$$

而建立在粘附理论上的摩擦系数为

$$\mu = \frac{\tau}{p} \quad (1-7)$$

式中 θ ——凹凸部分的倾角；

τ ——材料的抗剪强度；

p ——材料的压痕硬度（布氏硬度或维氏硬度）。

公式（1—7）成立的理由，首先，由于类似于图 1—3 的接触部分的面积（真实接触面积）很小，该处出现的塑性流动，达到了与压痕硬度 p （屈服压力）相等的压力。设载荷为 P ，则其接触面积为 P/p ，因此，该处的剪切力即为摩擦力 $F = \tau \frac{P}{p}$ ，所以， $\mu = (\tau P/p)/P = \tau/p$ 。

因此，摩擦系数 μ 决定于材料的硬度与抗剪强度这两个物理性能的数值。

粘附力的大小，从表 1—1 可以看出，通常，金属要大一些，塑料则较小。

通常，由于固体之间的粘附作用，其摩擦力比后面将要提到的边界摩擦为大，所以就要进行润滑。但是，在不可能或不适于使用液体润滑剂的情况下，一般在固体的摩擦面上，覆盖以 τ 值较低的固体材料（例如二硫化钼、石墨等称之为固体润滑剂一类的材料），能在一定程度内减轻其摩

擦。

铟与各种材料的粘附力

表 1—1

材 料	粘附系数*
金刚石	1
玻璃	1
碳化钨	1
金属 (铁、铜、锌、钴、银等)	1
铜、银厚的氧化膜	1
聚苯乙烯	0.5~0.7
聚四氟乙烯	0

* 粘附系数 = 错动所需的力/垂直力

(五) 边界摩擦 (边界润滑)

1. 气体吸附膜的影响

在真空中, 对洁净的铁的表面, 送入一定数量的氧气 (其分压为 $1 \sim 10$ Torr), 使其吸附于金属的表面, 这时的摩擦系数的变化, 如图 1—5 所示。

2. 液体吸附膜的影响

(1) 液体分子的结构

液体分子通常是长而大的, 而且在分子的末端具有极性原子团, 因此, 在固体表面上能形成一种很强的物理或化学的吸附性物质, 这时的摩擦系数是很低的 (参照图 1—6)。

(2) 液体分子膜的厚度

摩擦随分子膜层数的逐渐增多而降低, 但是, 一般在 10 层左右则达到饱和, 超过 10 层时, 即使增加分子膜的厚度, 则摩擦系数也

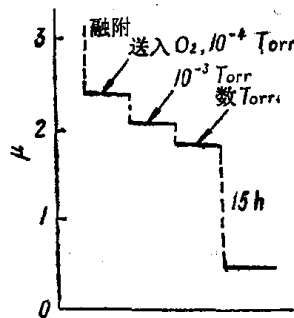


图 1—5 向洁净的铁的表面上送入氧气时的摩擦。只要送入少量的氧气, 摩擦系数 μ 就会显著地降低⁽¹⁾。

不再降低 (图 1—7)。油膜厚度的限度, 约为 10^{-6} mm。

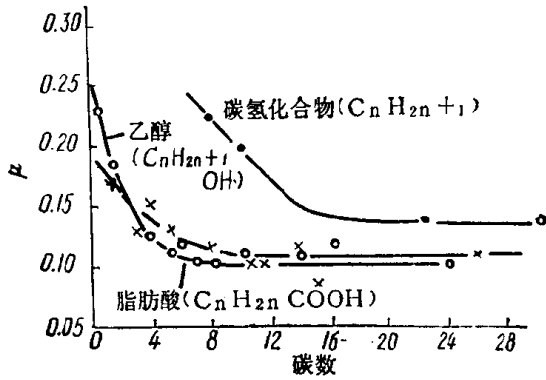


图 1—6 各种链式分子的含碳数与摩擦系数的关系^(*)

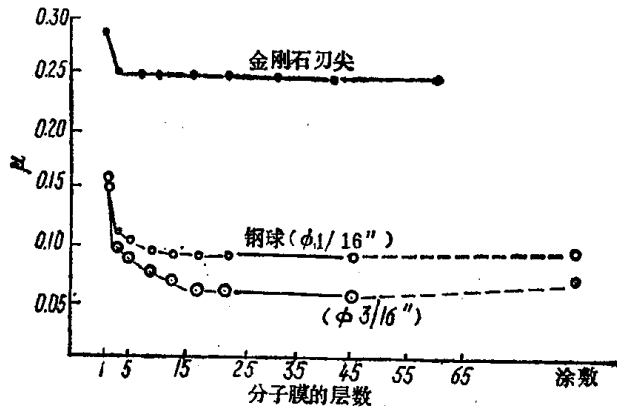


图 1—7 脂肪酸分子膜的厚度与摩擦系数的关系^(*)
摩擦板: 软钢, $P = 500\text{gf}$, $U = 0.05\text{mm/s}$ 。

(3) 极性添加剂

在润滑油内加入具有极性的添加剂 (油性添加剂或极压添加剂), 即使是很微量的 (一般在百分之几以下), 也能有选择地吸附于固体表面, 而形成边界润滑膜, 使之充分降低其摩擦系数 (图 1—8)。

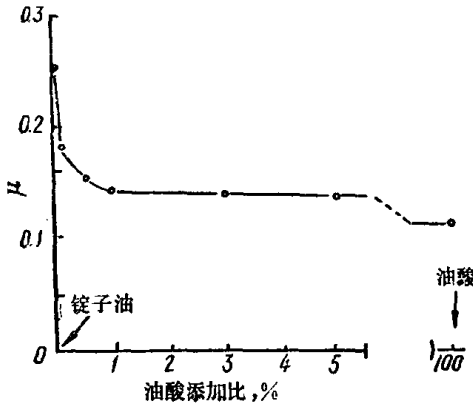


图 1—8 在铊子油内添加油酸时摩擦系数的变化⁽⁴⁾
(在振子式试验机上进行的试验)

(4) 边界摩擦的实际状态⁽⁵⁾

测定边界摩擦时，为了避免润滑油粘度大小的影响，通常是在低速高压的条件下进行的。

在低速高压的情况下，测定所谓的边界摩擦时，有两个重要的问题。

第一，在几乎不考虑粘度影响的低速高压的条件下，难免混有干摩擦部分的测定值，这是很自然的。尽管认为摩擦面是很光洁的整体，但是，对于边界润滑的实际状态来说，必须考虑到一定会有某种程度的干摩擦存在（实际上，或许是在较大的凸起尖端的附近产生的）。干摩擦部分成为发热与磨损的根源，这是毫无疑问的。这里，就这种干摩擦的危害程度做一定量的分析，会有助于对边界润滑表面实际状态的了解。

一般所说的边界润滑的表面状态，如图 1—9 所示。设全部载荷为 P ，干摩擦系数为 μ_d ，实际的边界摩擦部分与干摩擦部分的载荷分配比为 x_b 与 x_d ，它与整个的摩擦系数 μ'_b （测定的所谓边界摩擦的摩擦系数）之间有下列关系。其

中， μ_b 为真正的边界摩擦的摩擦系数。

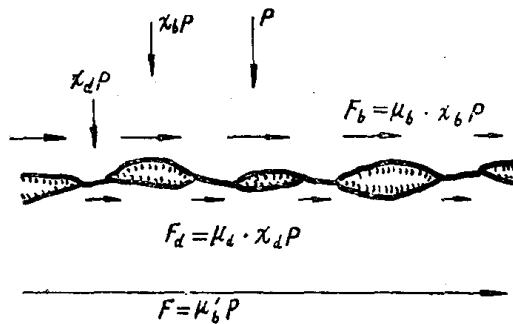


图1-9 边界摩擦 (F_b) 与干摩擦 (F_d) 的混合状态

$$\begin{cases} \mu'_b P = \mu_b x_b P + \mu_d x_d P & (1-8) \\ x_b + x_d = 1 & (1-9) \end{cases}$$

从上式得出:

$$\begin{cases} x_b = (\mu_d - \mu'_b) / (\mu_d - \mu_b) & (1-10) \\ x_d = (\mu'_b - \mu_b) / (\mu_d - \mu_b) & (1-11) \end{cases}$$

各种摩擦 (F_b, F_d) 与发热量 (H_b, H_d), 分别占整个摩擦 (F) 与发热量 (H) 的比例 r_b, r_d 为:

$$\begin{aligned} r_b &= F_b / F = H_b / H = \mu_b x_b / \mu'_b & (1-12) \\ r_d &= F_d / F = H_d / H (= 1 - r_b) = \mu_d x_d / \mu'_b & (1-13) \end{aligned}$$

这样, 当 μ'_b, μ_b, μ_d 已知时, 则可求出 x_b, x_d, r_b 及 r_d 的值。如果 $\mu'_b = 0.2, \mu_b = 0.08, \mu_d = 0.5$, 则 $x_b = 0.715, x_d = 0.285, r_b = 0.286, r_d = 0.714$ 。在一般情况下, 虽然 x_d 较 x_b 小得多, 但是, 可以观察到 r_d 远比 r_b 为大的摩擦状态。亦即, 通常是 $F_d \gg F_b, H_d \gg H_b$ 。

第二, 虽然是很低的速度与很高的载荷, 然而, 在有限的速度与载荷作用下, 理论上仍能形成一定厚度的流体膜, 而这种有限的边界润滑膜 (不能排除某种程度的固体接触),