

国外机械工业基本情况

摩 擦 学

广州机床研究所

武汉工学院

合编

机械工业出版社

一九八五

内容简介: 本资料为《国外机械工业基本情况》的摩擦学部分, 内容主要介绍摩擦学理论发展, 影响摩擦的因素, 磨损机理和防止磨损方法, 工况监测技术及世界各国的摩擦机构概况。可供本专业的工程技术人员、科技管理和规划人员、大专院校的教学工作者参考。

摩 擦 学

广州机床研究所
武汉工学院 合编

*

机械工业部科学技术情报研究所 编辑

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

机械工业出版社发行·机械工业出版社经销

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $10 \frac{3}{4}$ · 字数 251 千字

1987年3月北京第一版·1987年3月北京第一次印刷

印数 0,001—3,000 定价 3.10 元

*

统一书号: 15033·7082Q

出 版 说 明

机械工业肩负着为国民经济各部门提供技术装备的重任。为适应四化建设的需要，必须大力发展机械工业。上质量、上品种、上水平，提高经济效益，是今后一个时期机械工业的战略任务。为了借鉴国外机械工业的发展道路、措施方法和经验教训，了解国外机械工业的生产、技术和管理水平，以便探索我国机械工业具有自己特色的发展道路，我们组织编写了第三轮《国外机械工业基本情况》。这一轮是在前两轮的基础上，更全面、系统地介绍了国外机械工业的行业、企业、生产技术和科学研究等方面的综合情况，着重报道了国外机械工业七十年代末和八十年代初的水平以及本世纪末的发展趋向。

第三轮《国外机械工业基本情况》共一百余分册，参加组织编写的主编单位包括研究院所、工厂和高等院校共一百余个，编写人员计达一千余人。本书为《摩擦学》分册，主编单位是广州机床研究所，参加编写单位是武汉工学院，参加编写人员肖祥麟、廖大芳、刘兢生、杨明忠、张煜、钱士良、汪德涛、陈世钰和赵石莲等，责任编辑卢锦宝。

机械工业部科学技术情报研究所

目 录

第一章 摩擦	肖祥麟 (1)
1-1 引言	(1)
1-1.1 摩擦的定义	(1)
1-1.2 研究摩擦的重要性	(1)
1-2 摩擦理论的发展	(1)
1-2.1 古典摩擦三定律	(1)
1-2.2 摩擦的起因	(1)
1-2.2.1 凹凸学说	(2)
1-2.2.2 分子学说	(2)
1-2.2.3 机械-分子学说	(2)
1-2.2.4 摩擦新学说	(2)
1-3 影响摩擦的因素	(8)
1-3.1 表面参数	(8)
1-3.2 表面膜	(9)
1-3.3 硬度	(11)
1-3.4 压力及表观接触面积	(11)
1-3.5.1 真空中的摩擦	(11)
1-3.5.2 高速下的摩擦	(11)
1-3.5.3 高温下的摩擦	(12)
1-3.6 时间	(12)
1-4 非金属的摩擦	(12)
1-4.1 陶瓷的粘着和摩擦	(12)
1-4.2 弹性体的粘着和摩擦	(13)
1-4.3 聚合物的粘着和摩擦	(14)
第二章 磨损	刘兢生 (17)
2-1 磨损机理的研究	(17)
2-1.1 磨料磨损	(17)
2-1.1.1 定义	(18)
2-1.1.2 磨屑的形成	(18)
2-1.1.3 磨料磨损机理研究的发展	(18)
2-1.1.4 磨料磨损机理研究的新进展	(20)
2-1.2 粘附磨损	(20)
2-1.2.1 粘附磨损的产生	(20)
2-1.2.2 粘附磨损的型式	(20)
2-1.2.3 粘附磨损机理研究的发展	(22)
2-1.2.4 粘附磨损机理研究的新进展	(22)

2-1.3 腐蚀磨损	(23)
2-1.3.1 氧化磨损	(23)
2-1.3.2 氢致磨损	(24)
2-1.3.3 边界润滑磨损	(24)
2-1.3.4 其他介质腐蚀磨损	(24)
2-1.4 疲劳磨损	(24)
2-1.4.1 疲劳裂纹起始位置的争论	(25)
2-1.4.2 疲劳磨损机理研究的发展	(25)
2-1.4.3 疲劳磨损机理研究的新进展	(25)
2-1.5 微动磨损	(26)
2-1.5.1 定义和分类	(26)
2-1.5.2 微动磨损机理研究的发展	(26)
2-1.5.3 微动磨损机理研究的新进展	(27)
2-1.5.4 防止微动磨损的措施	(28)
2-1.5.5 主要发展趋势	(28)
2-1.6 剥层磨损	(28)
2-1.7 迁移层磨损	(29)
2-1.8 国外磨损研究动态	(30)
2-2 摩擦副减摩抗摩材料及表面处理	廖大芳 (10) (32)
2-2.1 导轨	(32)
2-2.2 齿轮	(34)
2-2.3 活塞环与缸套	(39)
2-2.4 凸轮及其随动件	(42)
2-2.5 滑动轴承	(44)
第三章 摩擦磨损的测试技术	杨明忠 (52)
3-1 影响摩擦磨过程的参数	(52)
3-1.1 温度	(53)
3-1.2 载荷	(53)
3-1.3 速度	(53)
3-1.4 接触面积和几何形状	(54)
3-1.5 滑动距离	(54)
3-1.6 气氛	(54)
3-1.7 材料特性	(55)
3-1.8 光洁度	(55)
3-1.9 振动	(55)
3-1.10 润滑类型	(55)
3-2 常用的摩擦磨损试验机	(56)
3-3 摩擦磨损试验机的选择	(57)
3-4 摩擦磨损试验步骤	(58)
3-5 模拟试验	(61)
3-6 摩擦磨损测试技术发展的新动向	(62)
3-6.1 新型摩擦磨损试验机	(62)

3-6.2 磨屑分析	(63)
3-6.3 摩擦表面的显微分析	(64)
3-6.4 摩擦磨损过程的动态监测	(64)
第四章 润滑理论	张煜 (67)
4-1 流体润滑理论的发展	(67)
4-2 流体动压技术及滑动轴承	(68)
4-3 流体静压技术的发展	(69)
4-4 动静混合支承技术的发展	(74)
4-5 弹性流体动压技术	(79)
4-6 磁流体润滑	(81)
4-7 非牛顿纯粘性流体润滑	钱士良 (81)
4-8 边界润滑	汪德涛 (85)
4-8.1 前言	(85)
4-8.2 边界润滑的概念形成	(85)
4-8.3 物理吸附	(86)
4-8.4 化学吸附	(87)
4-8.5 化学反应	(87)
4-8.6 边界润滑状态的分析测试技术	(87)
4-9 空气支承发展动态	陈世钰 (88)
4-9.1 空气支承性能有了显著的提高	(89)
4-9.2 空气静压支承的标准化、系列化、通用化	(89)
4-9.3 高速空气轴系稳定性方面的试验研究	(89)
4-9.4 计算方法	(89)
4-9.5 多孔质材料气体轴承的试验研究	(90)
4-9.6 气体支承结构的新发展	(90)
4-9.7 工艺问题	(91)
4-9.8 气源处理系统	(91)
4-9.9 在精密加工和测试设备方面的应用	(91)
4-10 磁力轴承	陈世钰 (92)
4-10.1 国外水平和发展趋势	(92)
4-10.2 磁力轴承在机床方面的应用	(93)
4-10.2.1 超高速铣削、钻削机床	(93)
4-10.2.2 超高速磨床	(93)
4-10.2.3 超精密加工机床	(93)
4-10.2.4 加工中心	(93)
4-10.2.5 适应性控制机床	(93)
第五章 润滑剂	汪德涛 (95)
5-1 前言	(95)
5-2 润滑油	(96)
5-3 润滑油添加剂	(98)
5-4 润滑油与节能	(98)
5-5 发动机油	(100)

5-6 齿轮油·····	(101)
5-7 液压油·····	(104)
5-8 汽轮机润滑油·····	(106)
5-9 防锈油脂·····	(106)
5-10 金属加工用油·····	(106)
5-10.1 金属切削液·····	(107)
5-10.2 金属成型加工润滑剂·····	(108)
5-11 润滑脂·····	(111)
5-12 合成润滑剂·····	(114)
5-13 固体润滑剂·····	(122)
5-13.1 前言·····	(122)
5-13.2 固体润滑剂的品种和使用方法·····	(123)
5-13.3 固体润滑剂的特性与作用·····	(124)
5-13.4 金属—层状固体复合材料·····	(126)
5-13.5 固体润滑剂的某些发展趋向·····	(126)
5-14 润滑剂的检验评价·····	赵石莲 (127)
第六章 机械设备的工况监测和故障诊断·····	汪德涛 (138)
6-1 引言·····	(138)
6-2 工况监测技术的分类·····	(138)
6-3 污染物与磨屑分析·····	(141)
6-3.1 磁塞检验法·····	(141)
6-3.2 光谱分析程序·····	(142)
6-3.3 铁谱法·····	(142)
6-3.4 颗粒计数法·····	(143)
6-3.5 放射性示踪原子检验法·····	(143)
6-3.6 斑点检验法·····	(143)
6-4 振动监测技术·····	(144)
6-5 完整性监测技术·····	(144)
6-5.1 渗透检查·····	(144)
6-5.2 磁性试验法·····	(144)
6-5.3 电无损探伤技术·····	(144)
6-5.4 涡流检测法·····	(144)
6-5.5 超声波检验·····	(145)
6-5.6 射线照片术·····	(145)
6-5.7 其他技术·····	(145)
附录 国外主要摩擦学机构简介·····	(147)
一、英国·····	(147)
二、美国·····	(150)
三、联邦德国·····	(152)
四、日本·····	(161)
五、苏联·····	(161)
六、其他国家·····	(161)

第一章 摩 擦

1 - 1 引 言

1-1.1 摩擦的定义

抵抗两物体接触表面发生切向相对运动的现象称为摩擦。

摩擦是造成能量损失的原因，它引起机械发热、表面层磨损及其它形式的破坏，因此降低机器的寿命和可靠性。

阻碍相对运动程度的大小常以阻力的大小来衡量，称为摩擦阻力（简称摩擦力）。

1-1.2 研究摩擦的重要性

研究摩擦的重要性在于：

（1）可根据对摩擦的研究来改进机械设计，采用更合适的对偶材料，选择恰当的表面处理，或选用适当的润滑剂来减少摩擦；

（2）另一方面，人类的生产、生活的各个方面，又须依靠足够大的摩擦，或者须将摩擦的大小控制在一个给定的狭小范围内；

（3）为了消除内摩擦引起的各种噪音。

1 - 2 摩擦理论的发展

1-1.2 古典摩擦三定律

对于摩擦现象的研究始于列奥那多·达芬奇（1452~1519年）。1508年，他用大理石做实验，指出：“对于两光滑表面，刚开始滑动时，摩擦阻力相等，此摩擦阻力的大小为其重量的 $1/4$ ，而与接触面积无关”。达芬奇说明了摩擦阻力与法向载荷（重量）成比例，比例常数（摩擦系数）为0.25。

1699年阿蒙顿在大量实验基础上建立了两个定律，第一定律为“滑动摩擦阻力的大小，与接触面间的法向载荷成正比，即 $F = \mu N$ ，式中 F 为摩擦力， N 为法向载荷， μ 为摩擦系数。第二定律为“滑动摩擦阻力的大小与接触面积无关”。

1780年库仑得出了第三定律：“动摩擦力与滑动速度无关”。

这三条定律作为公理一直延用到今天。但是实践表明，对于很光滑的表面，摩擦力将反而随表面粗糙度的减少而加大；对于纯净的光滑表面，由于在接触表面之间出现强烈的分子吸引力，摩擦力将与接触面积成正比；而且，当滑动速度较大时，摩擦力与速度有关；对于一些极硬（如钻石）或软（如聚四氟乙烯）的材料，摩擦力与正压力之间会出现非线性的关系。

所以，出现在18世纪以前的上述古典摩擦三定律，只能近似地反映摩擦的规律，其实际应用存在一定的局限性。

1-2.2 摩擦的起因

存在摩擦虽为大家所公认，但对于摩擦的起因却有不同的看法。

1-2.2.1 凹凸学说

阿蒙顿认识到他所研究的表面都不是光滑的,他认为由于接触表面的凹凸不平,当两表面接触时,两个面上的凹凸处互相咬合,接触表面要相对滑动,就必须沿着凹凸处反复地起落,或者把凸峰破坏,从而形成摩擦阻力。这就是“凹凸学说”即摩擦的机械理论。它把固体看成是绝对刚性的物体,此理论建立在固体表面的纯几何概念上,得出了光滑表面比粗糙表面摩擦要小的结论。但无法解释有些物体的表面虽十分光滑,摩擦系数却很大的现象。

1-2.2.2 分子学说

英国物理学家约翰·西奥菲勒恩·德萨古利埃(1683~1744年)在他的著作《实验物理学教程》中提出了一个截然不同的“分子学说”(1734年)。他认为:“摩擦力是由于接触面双方的分子相互吸引产生的,故表面愈光滑,摩擦阻力愈大。”按照这个学说,摩擦力的大小应与接触面积成比例。这又与大量实验的结论相矛盾。事实上,表面粗糙度如何并不是摩擦大小的依据。

1-2.2.3 机械—分子学说

1943年后凹凸学说与分子学说统一成“机械—分子学说”。典型的有英国的鲍登(F.P. Bowden, 1903~1908)和泰博(D. Tabor)的粘着摩擦学说;苏联克拉盖尔斯基(И.В. КРАГЕЛЬСКИЙ)的“粘着一变形”学说,以及格林(A.P. Green)1955年提出而由爱德华斯(C.M. Edwards)及霍林(J. Halling)1968年予以补充的“表面微凸体的塑性相互作用”学说。

鲍登与泰博认为:两个金属表面在负荷下接触时,在金属与金属的紧密接触区会发生牢固粘着,而接触点会发生“冷焊”(局部塑性变形),并在两表面相互滑动时被剪切;同时较硬的表面嵌进较软的材料基体中,使摩擦部分产生变形。

克拉盖尔斯基则认为:外摩擦力有两方面的特性,即由克服两表面间分子的相互作用力(粘着阻力),和使表面层形状改变的机械阻力(变形阻力)所决定。

1-2.2.4 摩擦新学说

目前,对摩擦的规律性及其机理的研究仍在不断深入。

泰博指出⁽¹⁾,无润滑的摩擦涉及下列三个基本现象:

- (1) 滑动表面间的实际接触面积;
- (2) 发生接触时,界面形成的结合强度的类型;
- (3) 滑动时,在接触区或接触区周围的材料剪切或断裂的方式。

由于摩擦主要是能量消耗的过程,因此,考虑摩擦时的能量是有意义的。Czichos, H. 指出,按照摩擦时机械能损失的过程,大致可分为:

- (1) 在接触区形成实际接触面积;
- (2) 在塑性变形、犁沟和粘着时机械能转换;
- (3) 热的散失。

没有“简单”模型可用于预计或计算一对摩擦付的摩擦,大家都承认摩擦是很复杂的现象。并且认为摩擦(以及磨损)不是材料固有的属性,影响摩擦的是大量的过程、条件和参数,如变形过程,环境气氛、界面介质、以及摩擦付材料的大量性能参数等。例如

- (i) 实际接触面积

近几年，对表面形貌及其摩擦接触中的作用愈来愈感兴趣^[2]，在试验中，假设在给定负荷作用下，分布在接触表面的某个高度的微凸体相接触，并产生弹性和塑性变形，这些接触点面积的总和就是实际接触面积，与之相关的特性和参数见图 1-1。

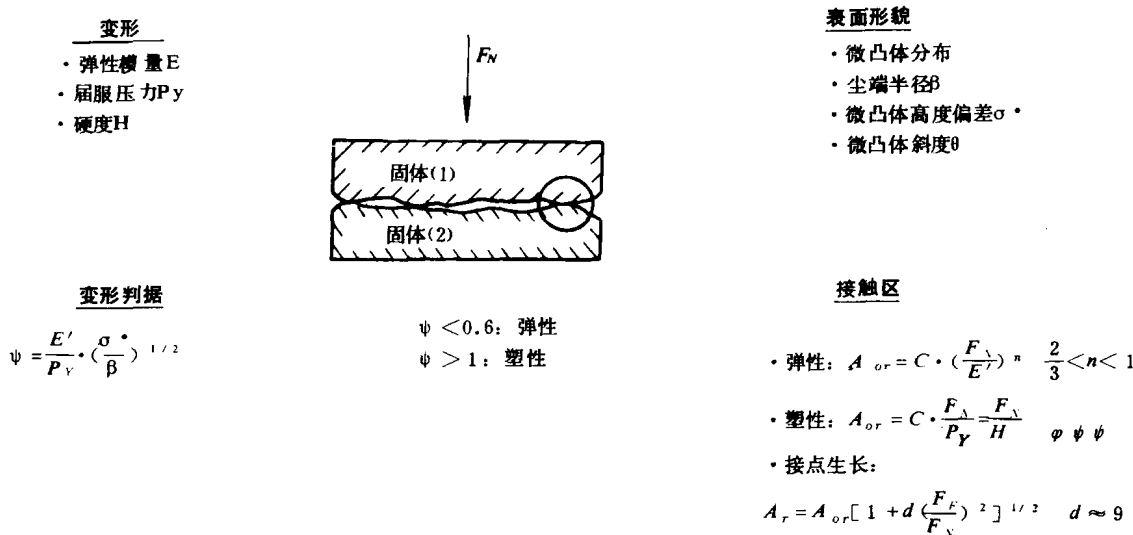


图 1-1 摩擦接触的特性

图上示出有两类特性，即变形特性和表面形貌特性。金属的接触状态判据用塑性指数 ψ 表示，根据 ψ 值的大小，用图 1-1 中的公式，就可判别是弹性或塑性变形。如果除法向负荷外还有切向力，则会发生接点生长，导致接触面积增大。下述情况会影响凸体接触特性：

- (1) 微凸体没有位错，则其硬度比本体材料的平均值高；
 - (2) 表面膜（例如氧化膜）可能改变材料的变形特性，例如，50 Å 厚的氧化表面层，将使镍的硬度增加五倍^[3]；
 - (3) 温度的影响导致塑流和烧结，以及大大地增加接触面积^[4]。
- (ii) 摩擦的粘着分量

界面粘着键的形成和破裂产生了摩擦的粘着分量，这些键是界面原子内部力作用的结果。理论上，两接触固体之间的相互作用力，至少在原则上，包括影响固体内聚力的所有类型的相互作用。例如金属键，共价键和离子键，即化学键（短程力）和范德华键（长程力）。两块清洁的金相接触，在原子接触区形成金属键，界面具有本体金属强度；清洁的金刚石的表面力类似价键力；岩盐的表面力部分是离子键力。所有这些力本质上是短程力。长程范德华力作用在软似橡胶的金属之间和聚合物固体之间的粘着。陶瓷和聚合物界面之间的粘着就如同金属之间的粘着。

摩擦的粘着分量，以界面剪切强度和微凸体屈服压力的商表示，是鲍登和泰博在一个高度简化的模型中得到的，见图 2^[5]。

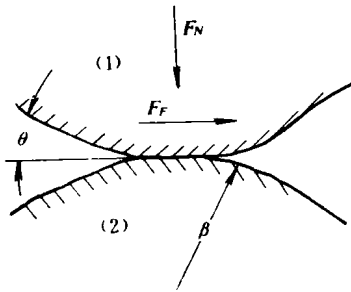
对于大多数材料，这个比值是 0.2，摩擦系数将也是这个值。对于清洁金属，摩擦力粘着分量的值，由于接点的生长，将可增加至 10~100。另一方面，如果接触表面间有膜隔开，它的有效剪切强度约为母体金属的一半，则摩擦系数将是 0.1。

进一步考虑了固体的特性，别的一些学说把鲍登和泰博的粘着分量模型扩展了（参见

(1) 表面能学说 (Rabinnowicz, E) 引入了接触偶对的表面能作为一个重要参数。

(2) 断裂力学模型 (Marx, U.) 一考虑了粘着接点的断裂。

考虑摩擦的粘着分量时必须强调, 像界面剪切强度或表面能都是给定的配对材料付的特性, 而不是单个零件所具有的特性。



摩擦的粘着分量

• 最简模型:

$$f_a = \frac{f_F}{F_N} \approx \frac{\tau_{s12}}{P_1}$$

τ_{s12} : 界面剪切强度

P_1 : 屈服压力

• 表面能学说: $f_a = \frac{\tau_{s12}}{P_1} \left[1 - 2 \frac{W_{12} \cdot \tan \theta}{\beta \cdot q_v} \right]$

式中 $W_{12} = r_1 + r_2 - r_{12}$: 表面能

断裂力学模型: $f_a = \frac{\sigma_{12} \cdot \sigma_c}{n \cdot (F \cdot H)^{1/2}}$

σ_{12} : 界面拉伸强度

σ_c : 临界开裂因子

n : 加工硬化因子

H : 硬度

图 1-2 摩擦的粘着模型

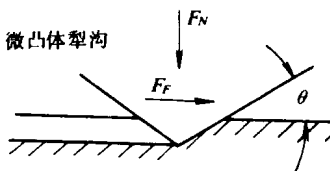
(iii) 摩擦的犁沟分量

如果滑动时, 摩擦接触的一个表面大大地硬于另一个, 则很显然, 硬的微凸体可能嵌入较软的表面, 切向运动时因而引起阻力, 这将大大地影响摩擦阻力。

简化后, 犁沟分量包括微凸体及磨屑引起的阻力。参见图 1-3, 最简单的模型是锥形微凸体, 摩擦系数与它的 θ 角的正切有关 (见图 3)。

由于忽略了滑动时材料在犁沟前方的堆积, 所得的摩擦系数值 $f = 0.05$, 可认为是一个偏低值。

由于脆性材料表面在犁沟时, 可能发生微裂纹, Zum Gahr 提出了一个模型⁶⁾, 在这个关于犁沟的断裂力学模型中, 断裂韧性、弹性模量和硬度等材料特性是主要影响参数。



最简模型

$$f_p = \frac{2}{\pi} \tan \theta$$

犁沟和微裂纹

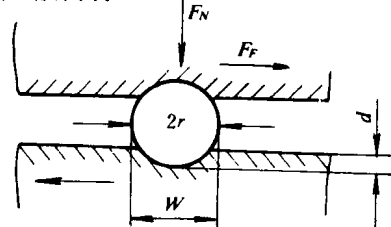
$$f_p = \frac{F_F}{F_N} = C \frac{K_{IC}^2}{E \cdot (H \cdot F)^{1/2}}$$

K_{IC} : 断裂韧性

E : 弹性模量

H : 硬度

嵌入磨屑犁沟



$$f_p = \frac{2}{\pi} \left\{ \left(\frac{2r}{W} \right)^2 \cdot \sin^{-1} \frac{W}{2r} - \left[\left(\frac{2r}{W} \right)^2 - 1 \right]^{1/2} \right\}$$

图 1-3 摩擦的犁沟模型

由磨屑嵌入接触表面引起的犁沟，是Nam P.Suh和他的同事提出的(7)。他们的分析表明，摩擦的犁沟分量与微粒曲率和嵌入深度之比有很大关系，这说明，微凸体的几何特性或嵌入的磨屑可能巨大的影响滑动表面的摩擦状态。

(iv) 摩擦的变形分量

新的关于摩擦的变形分量的滑移线学说的模型是Challen和Oxley于1979年提出的(8)。

(Heilmann和Rigney提出了另一个模型(9)。主要的假设是“在稳态滑动时，摩擦功等于塑性变形功，。

下面分别介绍NamP.Suh和D.H.Rigney的新学说。

1981年，Nam p.Suh等人提出了“摩擦的起因”新学说(10)。他们认为，迄今为止，粘着学说较之其它学说有明显的优点，但是用粘着学说所预计的数据并不总是与实验所得数据一致。实验数据往往偏大。当实验在隋性气氛下进行时，粘着学说预计得更差，而隋性气氛正是粘着学说在推导摩擦系数时所假定的环境。以互溶性为基础的滑动表面相容性理论，不能解释化学溶解度差别很小时，摩擦状态的很大变化。由于摩擦的粘着学说强调微凸体之间粘着的重要性，过去很注意表面能所起的作用和接触材料的互溶性，证实了金属有较大的溶解度将更易于形成强的接点，因此有较大的摩擦和磨损。然而，某些这类解释现在受到怀疑，因为表面容易受到化学吸附和物理吸附的污染，于是表面的化学成份将不同于本体的(11)。滑动时，如果界面升温不大，则一些材料的机械性能对摩擦状态的影响，较其化学性能的影响要大。MIT所做的工作指出(12)，摩擦状态并不仅仅取决于粘着，摩擦力是滑动时间的函数，在稳态摩擦状态达到之前的早期滑动时，摩擦力有较大的变化。摩擦状态与时间有关这一性质过去被忽视了。

因此，Suh等人提出了一个不同的学说来解释材料的摩擦状态，他们论证了在典型滑动条件下，刚开始滑动时，粘着并不起重大作用。并且论证了摩擦力是由于微凸体变形、磨屑犁沟与粘着三者作用的结果。此外，新学说表明摩擦系数不是已知材料的属性，因为摩擦系数取决于对表面的机械性能和环境因素。

Suh等人实验所用的材料见表1-1。

表1-1 实验材料

材 料	热 处 理	维氏硬度(MPa)	渗碳体体积比
工 业 纯 铁	973 K, 1 小时; 空冷	980 ± 50	0.0004
AISI1020钢	球化处理: 1173 K, 15分; 油淬 673 K, 1 小时; 空冷	1710 ± 100	0.020
AISI1045钢	球化处理: 1173 K, 15分; 油淬 673 K, 1 小时; 空冷	4120 ± 130	0.067
AISI1095钢	球化处理 1173 K, 15分; 油淬 673 K, 1 小时; 空气	6080 ± 350	0.142

注：有些试验用铜与AISI1020钢相对滑动，铜表面用4 / 0 砂纸磨光。

实验装置为：φ6.35毫米的试样成交叉圆柱式放置，一个旋转，另一个圆柱不旋转（称作滑块）。运动由一台车床实现。

实验条件：实验在纯氩气氛中进行。有一些AISI1020钢的实验在空气中进行，有的无润滑，有的以水和轻机油作润滑剂。法向负荷为1千克力（9.8牛）；滑动速度为0.02米/秒；总的滑动距离为36米；室温。

实验结果：见表1-2。

表1-2 摩擦系数

滑块材料 (静止圆柱)	摩擦 系数	试件材料 (旋转圆柱)			
		纯铁	1020钢	1045钢	1095钢
纯铁	μ_i	0.13	0.20	0.24	0.20
	μ_s	0.71	0.75	0.69	0.76
	μ^*	—	—	—	—
1020钢	μ_i	0.18	0.20	0.13	0.12
	μ_s	0.55	0.68	0.57	0.65
	μ^*	0.80	—	—	—
1045钢	μ_i	0.16	0.17	0.17	0.12
	μ_s	0.52	0.53	0.71	0.69
	μ^*	0.77	0.71	—	—
1095钢	μ_i	0.17	0.17	0.14	0.17
	μ_s	0.51	0.54	0.58	0.65
	μ^*	0.76	0.73	—	—

注： μ_i 为初始摩擦系数； μ_s 为稳态摩擦系数； μ^* 为摩擦系数的峰值。

有几个重要的实验结果值得密切注意

(1) 摩擦系数随滑动距离而变，尤其在滑动的早期更是如此，摩擦系数的初始值常较低，逐渐增加至稳态值；如果静止圆柱比旋转圆柱要硬一些，则摩擦系数达到最大值后出现下降情况；不管是哪种试验材料，也不管有无润滑，初始摩擦系数常在0.1~0.2范围内。

(2) 同样的金属对磨，或者静止圆柱较软而旋转圆柱较硬时，所得到的稳态摩擦系数值，要高于静上圆柱较旋转圆柱为硬时的值。摩擦状态的改变与表面形貌的改变有关，表面形貌用扫描电镜观察的结果表明：当静止圆柱较硬时，硬表面抛光至镜面，而软表面的高点也得到同样的镜面，剥落以后，新的高点将被抛至镜面。但静止圆柱较软或者同样的金属相对摩擦时，不发生上述情况，这时可观察到犁出来的沟型，而且表面粗糙[12]。

Su h等人的对摩擦起因的假设如下：

“滑动表面之间的摩擦系数由三个分量组成，即，微凸体的变形分量 μ_d 、犁沟分量 μ_p 和粘着分量 μ_a 。由于这些分量所起的作用随滑动距离、所用材料、表面形貌及环境而异，所以摩擦系数亦随这些界面的滑动条件而变”。

为了阐明上述假设，摩擦状态随时间而变的情况可定性地分为下列六个级段：

阶段1：摩擦系数在早期的值，受微凸体在表面犁沟影响。由于表面被污染，粘着在这阶段并不起重要作用。影响静摩擦系数的微凸体的变形，在滑动开始时并不发生。在这个阶段，微凸体变形并不是决定摩擦系数的重要因素，这时表面易被抛光及产生新的微凸体。结

果，这个阶段的摩擦系数 μ 基本上与材料组合、表面条件和环境条件无关。

阶段 2：因为粘着增加，摩擦力缓慢上升。如果界面有润滑，则阶段 1 可延续较长时间而阶段 2 不再出现。如果微凸体变形与断裂所产生的磨屑，被留在滑动表面之间并犁表面，摩擦力随时间上升得比较快。

阶段 3：由于留在滑动表面之间的磨屑在数量上增加很快，摩擦力随时间也很快上升。当然，清洁界面区域内，由于粘着的增加，也会使摩擦力随时间上升。使微凸体变形所需要的力将继续对摩擦力产生影响。

阶段 4：在这阶段中，留在界面的磨屑保持为常数，粘着对摩擦的影响也不变。由于剥落出现新的粗糙表面，其微凸体的变形仍起重要作用，但在大多数情况下，微凸体变形对摩擦的影响不如犁沟的影响大，因为微凸体易于变形而产生新微凸体的频率又低。当两个同样的金属相对滑动，或者造成阶段 5 的机理还未能起决定作用时，阶段 4 的摩擦系数是稳态摩擦系数。

阶段 5：在某些情况下，譬如静止圆柱很硬，当它在软的旋转圆柱上相对滑动时，硬表面的微凸体逐渐被去除，出现镜面，磨屑不能在抛光了的硬表面上留住，致使犁沟作用减弱，再加上微凸体变形的减少，使摩擦力下降。

阶段 6：最后，当硬表面大范围地变得镜面般光滑时，较软表面也因此得到同样的镜面，摩擦系数维持一定大小不变。但由于磨屑剥落时形成“坑洞”，表面不可能完全光滑，这些坑洞使磨屑能留在界面，当硬表面与软表面相对滑动时，硬表面仍然粗糙而不发生抛光现象，致使阶段 5 及阶段 6 不能出现。

六个阶段的摩擦系数随滑动距离而变的关系见图 1-4。

至于三个分量的数值： μ_a 的范围为 0 ~ 0.4；

μ_p 的值为 0 ~ 1.0；而 μ_d 的值在 0.43 ~ 0.75 之间。

美国俄亥俄州立大学冶金工程系教授 Rigney, D.H. 提出了摩擦的能量模型，主要的假定是：稳态滑动时，摩擦功等于塑性变形功。即，在稳态时全部摩擦功用使材料塑性变形，并且功消耗成热。

用这个能量模型可改进摩擦系数的表达式，使根据粘着学说推导而得的摩擦系数的表达式只是这个能量模型的一个特例。

而且，这个模型也能用于较复杂的系统，如含有涂复层的情况，特别是能用于硬基底上有软复层，以及软材料上有硬复层的情况。摩擦系数可作为层厚的函数而预计到，可进而利用复层得到低的摩擦系数。新模型也可用于含有反应层，迁移材料和不同厚度的固体润滑剂的系统。另外，模型有助于理解摩擦系数随时间的变化过程以及饱和过程：

根据能量模型推导而得摩擦系数表达式为：

$$\mu = \frac{N A}{L} C_{max} F \left(\frac{\tau_s}{\tau_{max}} \right)$$

式中 N 为微凸体接触的“点”的个数；

A 为接触点处的平均面积，故 NA 代表总的实际接触面积；

L 为法向载荷；

τ_{max} 是材料的极限剪切强度；

τ_s 是滑动时在表面实际得到的平均剪切应力，稳态时， τ_s 不随时间而变；

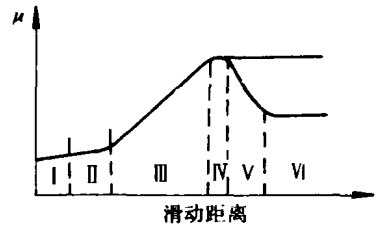


图 1-4

$F\left(\frac{\tau_s}{\tau_{max}}\right)$ 是表示 $\frac{\tau_s}{\tau_{max}}$ 的函数, 当 $\frac{\tau_s}{\tau_{max}} \rightarrow 1$ 时, 函数值 $\rightarrow 1$ 。

从这个表达式可看到, 决定摩擦系数的是三个参数 τ_{max} , τ_s 和 $\frac{N \cdot A}{L}$ 。

第一个参数是 τ_{max} , 它是材料的基本性能参数, 能以独立的试验测试出来。

第二个参数是 τ_s , 它取决于很多实验参数, 例如负荷、温度、滑动速度以及材料特性, 如晶粒结构、显微结构、加工硬化率和回复率。对于给定材料的所有这些变量的函数 τ_s , 运用现有的知识是很难或甚至不可能计算出的。也许用测量的办法较好。但是注意, 如用 X-射线, 则测得的是表面下扩大了了的区域的材料的平均剪切应力值。

第三个用来计算 μ 的参数是实际接触面积 $N \cdot A$ 与所加负荷 L 的比值。由于硬度是易于得到的材料参数, 硬度定义为 $P = \frac{\text{负荷}}{\text{接触面积}}$, 而微凸体在滑动时所起的作用与压头类同, 故比较 $\frac{L}{N \cdot A}$ 与硬度是有意义的, 但要注意, 微凸体滑动时, 除了有压力外还有剪切力, 因而其实

际接触面积 $N \cdot A$ 将可能不同于支承纯压缩负荷下的接触面积。所以 $\frac{L}{N \cdot A}$ 不一定与 P 相等, 如

果 $\frac{L}{N \cdot A} \approx P$, 则摩擦系数 $\mu = \frac{\tau_{max}}{P} F\left(\frac{\tau_s}{\tau_{max}}\right)$ 这个结果与鲍登—泰博根据粘着学说推导出来的

公式极其相似, 即 $\mu = \frac{\text{剪切强度}}{\text{压痕硬度}}$, 式中的剪切强度没有明确规定, 它可以是本体材料的剪

切屈服强度, 也可以是 τ_{max} , 一般选这个围周内的低端值。式中没有可与 $F\left(\frac{\tau_s}{\tau_{max}}\right)$ 相对

应的项, 但当在高负荷下连续滑动时, 表面应力较高, τ_s 的值接近 τ_{max} , 因此 $F\left(\frac{\tau_s}{\tau_{max}}\right) = 1$, 于是新模型与老的粘着模型具有相同的形式。不过新模型中用 τ_{max} 代表剪切强度, 故所得的 μ 值高于粘着模型所得之值。这样, 新模型至少部分避免了对粘着模型的最早的批评之一, 即粘着模型所得到的计算值 μ 比实验所得到的值低。

新模型只是在上述特定情况下, 才与粘着模型有相似的结果, 而新模型更一般, 适合于很多不同的滑动情况。例如, 模型能容易地扩展成适合较复杂的有复层的情况。

1-3 影响摩擦的因素

1-3.1 表面参数

表面形貌显著影响滑动表面间的摩擦。表面形貌可以用不同的参数表示, 但以同时用表面粗糙度高度和波长来表示影响表面间摩擦的参数较好^[13]。此外, 粗糙度的平均斜率与摩擦系数密切相关, 自相关系数只在在轴承间比较时用。其它参数不决定摩擦系数。

表面粗糙度高度可用 $\frac{R_p}{R_a}$ 表示, 即粗糙度深度与粗糙度算术平均值之比。(参见图 1-5)。表示粗糙度波长的参数是平均波长 λ_a 和波长指数 λ_{ind} 。

忽略粗糙度高度变化的影响时, 摩擦系数随平均波长的增加而增加: 如果微凸体高度保持常数, 平均波长增加导致摩擦系数的下降; 如果平均波长不变, 粗糙度高度的增加将导致摩擦系数的上升。比较起来, 粗糙度高度参数比平均波长对摩擦的影响大些。

倾斜角 α 增加时, 摩擦系数随之增加。

平均斜率用下述方法确定, 量出等间隔 h ($\leq \pm 0.001\text{mm}$) 的 m 个点的粗糙度高度 $Y_0, Y_1, \dots, Y_m$, 每点的斜率用 D.J. Whitehouse 给出的下列关系式决定: 在 Y_0 点, 斜率为 $\frac{dY_0}{dx} = \frac{1}{60h}(Y_3 - 9Y_2 + 45Y_1 - 45Y_{-1} + 9Y_{-2} - Y_{-3})$ 。上式可改进为: $\frac{dY_0}{dx} = \frac{1}{h}(Y_{+1} - Y_{-1})$,

每点的斜率均可同样决定。平均高度 $Y_{av} = \frac{1}{m-1} \sum_{n=1}^{m-1} \frac{dY_n}{dx}$, 平均波长引数 λ_{ind} 可用 R.C.

Spragg 给出的关系式找出: $\lambda_{ind} = \frac{R_a}{Y_{av}}$

式中 R_a 为粗糙度的算术平均高度。 Y_{av} 为平均高度。

目前, 用统计技术描述粗糙表面的特性已经取得进展。根据单个轮廓上所算得的各个波峰与均值线交点的数目, 就能完全画出某些粗糙表面的完整的统计微观几何形状。看来, 绘制三维图的方法目前已趋完善, 所得到的数据可以用数字处理, 并提供关于微凸体的统计学的高度, 峰值, 平均微凸体斜率, 微凸体尖端的有效曲率和其它特征。如 Whitehouse 所指出的 [14], 表面形貌信息的处理, 导致市场上能买到的软件的发展, 这些软件常常提供大量的表面参数, 其中大部分是多余的。

根据我们现有的对于表面形貌的知识, 已能知道表面接触时微凸体的变形途径, 但仍然不可能进行实际接触面积的数量计算。这是因为到现在为止, 没有明确的方法可用来决定合适的横向的抽样长度。例如, 没有回答的问题之一是: 如果有小微凸体存在于较大的微凸体之间, 如何说明哪些微凸体尺寸范围是可以忽略的。当然, 不管抽样长度如何假定, 可以给实际接触面积规定一个下限, 就是, 在较软金属的屈服压力下, 所有微凸体都产生塑性变形时的面积为实际接触面积。另一个问题是, 滑动时微凸体是如何失效的(剪切、断裂、撕裂), 这是分析摩擦过程时所遇到的问题。

现在已有一系列的方法, 可用来在原子和电子级别上研究固体表面 [15], 包括俄歇电子频谱测定法、X射线光电频谱测定法、扫描离子频谱测定法和离子衍射频谱测定法等这些方法都能对表面进行原子级的研究, 它们与扫描电镜 X射线能量分析法以及显微探针分析法所获得的资料相结合, 有助于对表面现象作出摩擦学的解释 [16]。

这些技术提供了不同的一个个信息。协调所有这些信息, 将能提供相互密切结合的、独立的表面描述。同样, 也可对复盖了气体吸附膜、润滑剂和摩擦转移膜的表面进行描述。这样的表面研究将有助于对摩擦过程的了解。

1-3.2 表面膜

金属置于大气中, 表面必然生成氧化膜、吸附膜和其它污染膜。极小量的污染物质, 特

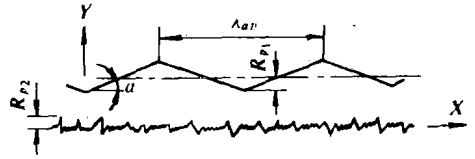


图 1-5

别是氧，能大大减少金属之间的粘着^[15]，从而大大减少摩擦(和磨损)。但对不同的金属摩擦的影响不同。在有些情况下，适当数量的氧化物只使粘着略有减少^[17]。而在另一些情况下，如镍上的单原子层的氧会增加粘着。这是值得进行理论和实验研究的。此外，表面膜可能改变接近它的头几个原子层的金属的力学性能，关于这个问题的研究是零碎进行的、值得进行系统的研究。还有一个需要重新研究的问题是表面膜的破裂或被去除的过程。

Georges, J.M.研究了边界润滑时所得到的表面膜，分析了它的力学、物理和化学的性能^[18]。主要的两点结论是：第一，在边界润滑状态下，两个固体表面相对滑动会在界面产生第三种物质。第二，界面的性质及其演变决定于生成物的胶态特性。他认为摩擦界面层的性质决定于环境条件。在运动和摩擦之前，环境与表面起反应，例如，添加剂或润滑剂基本组份被吸收，或与金属反应生成新的反应物。这与氧和氧化膜的现象类似^[19]。这时生成的摩擦界面层的厚度一般很小，只有分子水平。由于它的质地不匀，它的成份的化学和结构测定很困难，即使用现代的分析工具（X-射线光电子能谱仪、俄歇能谱仪、二次离子质谱仪、……等）也是如此。金属表面基本上是氧化物的水合物和被吸收的润滑剂，这些生成物是摩擦时生成胶状糊的基本材料。在特定条件下，如很高局部压力、接触高温、被溶解的氧的出现、水的存在等，这个糊可能在磨擦时起化学变化，起磨粒作用造成表面擦伤。但是表面金属不断损失的主要原因可能还是粘着。

Kapra^[20]在平面-平面试验机上研究了表观接触压力对摩擦化学膜的生成影响。表观接触面积为10平方毫米，使用了不同的负荷（从50~3000牛顿）。当压力在30~235MPa范围内时，表面出现摩擦化学膜，这时表面之间的接触电阻值与压力大小无关。一块块的蓝色膜覆盖在金属表面，复盖的表观面积也与压力无关，约占25~30%，每块复层尺寸为直径3~6微米，膜的化学性质和界面厚度也与压力大小无关。但如果压力太小，则不能形成摩擦化学膜，因为界面内产生的磨粒不能被充分剪切掉。如果压力太高，在可起保护作用的摩擦化学膜形成以前，表面就咬死了。

1-3.3 硬度^[21]

在润滑条件下，摩擦系数与硬度无关，保持几乎恒定的低值。在干摩擦条件下，表面愈硬摩擦系数越低。直观地认为，软材料的摩擦一定比硬材料大得多，但实际上硬度的摩擦是很小的。如锡和硬钢二者的硬度相差100倍或更多，但前者摩擦只不过比后者大1~2倍。

对于相对摩擦的纯金属，摩擦系数随硬度的增加而显著地减小。这是因为纯金属在一起摩擦时，摩擦系数与 $\frac{\text{剪切强度}}{\text{硬度}}$ 的值成某种线性函数关系。

当两种不同的金属在一起摩擦时，摩擦特性与较软的金属所组成的配对相类似：摩擦系数数值稍有减少。

对于合金，通过适当的热处理提高表面硬度后，呈现出较低的摩擦力，减小的趋势也是明显的。

对于低碳钢，由淬火而导致的表面硬度的增加使摩擦力减小。

对于中碳钢，在干摩擦的滑动条件下，摩擦阻力随硬度的增加而减小。如发生了相变的水淬试样，硬度升高到退火或炉冷试样的三倍左右时，摩擦系数大约减少20~25%。

对于热处理过的黄铜和铍青铜等有色金属，摩擦试验的结果表明了类似的结论，即较硬表面有较低的摩擦力。