

摩擦与磨损

靳自齐 尚本立 王圣雄 等编
西安交通大学出版社



内 容 提 要

高等学校教材

摩 擦 与 磨 损

靳自齐 尚本立 王圣雄 等编

江苏工业学院图书馆
藏书章

西安交通大学出版社

内 容 简 介

本书介绍了金属、塑料、橡胶、陶瓷、木材和纺织纤维等方面的摩擦磨损机理和实验方法。对一般著作中论述较少的“微动磨损”专列一章，作了较为详细的论述。本书内容丰富，分析论证清楚，对摩擦磨损中的一些重要问题都作了较为深入的探讨；既可作为高等工科院校有关专业的教材，又有一定的工程实用价值，可供研究部门、工程设计单位的工程技术人员参考。

(陕)新登字 007 号

摩擦与磨损

新自齐 尚本立 王圣雄 等编

责任编辑 高民军

西安交通大学出版社出版

邮政编码 710049

西安工业学院印刷厂印刷

陕西省新华书店经售

开本 787×1092 1/16 印张 12.375 字数 290 千字

1991 年 9 月第 1 版 1991 年 9 月第 1 次印刷

印数: 1-500

ISBN 7-5605-0070-6/TH·7 定价: 7.90 元

前 言

人们对固体强度学较摩擦学的认识要成熟得多，因此在设计机器时一定会对重要的构件进行强度计算，而却不大注意根据具体情况采取最有效的减磨措施。实际上，根据统计资料，机器中作相对运动的构件失效，主要是由于磨损而并不是由于强度问题。

就目前情况来讲，还不可能用定量方法来精确地计算摩擦和磨损，只能就具体情况通过试验取得可靠的资料。这不仅是由于微观表面的复杂性，而且也由于环境因素。这方面已有大量的资料可供借鉴。对摩擦磨损机理的研究成果也有丰富的文献。利用现有的研究成果和关于摩擦学方面的知识已能有效的解决摩擦部件的材料选择和应采取的工艺措施。从而有效地提高机器设备的利用率和使用寿命。

英国学者 A·D·Sarkar 所著《摩擦与磨损》一书，对摩擦磨损方面的研究成果作了系统的分析和总结。我们在编写过程中一方面参考了这本著作，同时吸收了国内外近年来一些研究成果，本书内容除分析研究金属材料的摩擦磨损机理外，还以一定篇幅论述了如聚合物、橡胶、陶瓷等的摩擦与磨损问题。另外还编入了纺织纤维材料和纺织工艺过程中的摩擦与磨损问题。内容丰富新颖、分析论证详实，不仅对摩擦磨损机理作了较为深入的探讨和研究，同时提供了实验方法和参考数据。可供高等学校师生使用，对于研究部门、工程设计单位的工程技术人员更具有一定的实用价值。

参加本书编写的人员为：西北工业大学屈中元(前言和第一章)，西北纺织工学院靳自齐(第二、五、十二章)，尚本立(第三、四、九、十四章)，西安工业学院王圣雄(第六、七、十三章)，西北纺织工学院王承武(第八、十一章)，刘庚麟(第十章)。由靳自齐担任主编，尚本立和王圣雄任副主编，西安交通大学出版社高民军担任责任编辑。本书稿最后经西安交通大学朱均教授审校，提供了很多宝贵意见，使书稿得到进一步完善，在此深表谢意。

摩擦学是一门涉及知识面很广的边缘学科，由于编者水平有限，书中缺点和错误在所难免，恳请读者提出宝贵意见，给予指正。

编 者

1991年5月

目 录

前 言	
第一章 绪 论	
1.1 磨损形式	1
1.2 实验方法	2
第二章 摩 擦	
2.1 摩擦定律	4
2.2 分子理论	6
2.3 剪切及犁沟作用	8
2.4 表面污染	12
2.5 两个粗糙表面	14
2.6 弹性恢复	14
2.7 粘-滑	15
2.8 功与能	18
第三章 粘着磨损	
3.1 摩擦副	21
3.2 原子模型	22
3.3 微凸体的相互作用	23
3.4 表面污染	26
3.5 氧化作用	27
3.6 跑合磨损	30
3.7 金属的转移	33
3.8 能量模型	35
3.9 磨 屑	35
3.10 剥层理论	37
3.11 滑移场	39
第四章 磨料磨损	
4.1 磨料磨损的类型	40
4.2 基本原理	41
4.3 攻 角	42
4.4 磨料的特性	42
4.5 材料硬度	44
4.6 能量准则	44
4.7 二体磨料磨损	46
4.8 高应力磨料磨损	49

4.9	低应力磨料磨损	52
4.10	碳化物	53
4.11	犁 铧	55
第五章 浸蚀磨损		
5.1	冲击与损伤数	57
5.2	凹坑体积	58
5.3	变形形式与冲击取向	61
5.4	冲击速度	62
5.5	冲击角	63
5.6	脆性材料的浸蚀	65
5.7	抛射体的碎裂	66
5.8	压痕理论	67
5.9	初始浸蚀与次生浸蚀	70
5.10	材料性能	73
第六章 微动磨损		
6.1	微动磨损的定义、特点及其造成的损害	75
6.2	实验装置	77
6.3	实验研究	79
6.4	机 理	83
6.5	减缓措施	86
第七章 滚动接触		
7.1	瞬时中心	88
7.2	槽形滚道	88
7.3	在弹性平表面上的滚动	89
7.4	在塑性范围内的滚动	91
7.5	粘着效应	92
7.6	工作硬化	92
7.7	轴承寿命	93
7.8	磨损机理	94
7.9	滑 移	97
7.10	切 边	98
7.11	材 料	99
第八章 金属与合金		
8.1	晶体结构与固溶度	102
8.2	黄 铜	103
8.3	钢	104
8.4	铸 铁	106
8.5	铝-硅合金	108
第九章 聚合物摩擦学		

9.1	实验室研究	114
9.2	对磨面的粗糙度	114
9.3	转移膜	116
9.4	润 滑	117
9.5	摩 擦	118
9.6	速度和温度	119
9.7	结晶型聚合物	122
9.8	复合材料及其添加剂	129
第十章 橡 胶		
10.1	粘着与滞后	131
10.2	速 度	132
10.3	力学模型与混合理论	132
10.4	滞后摩擦	134
10.5	Scallamach 波纹	135
10.6	粘着功	137
10.7	磨 损	138
10.8	车 胎	141
第十一章 其他非金属材料		
11.1	纤维材料	143
11.2	陶 瓷	145
第十二章 摩擦与制动		
12.1	制动途径与制动力矩	153
12.2	摩擦热	154
12.3	制动器摩擦材料	157
12.4	实验方法	159
12.5	摩擦和磨损	161
第十三章 干轴承		
13.1	$p-v$ 值	165
13.2	轴承寿命	166
13.3	合成聚合物	168
13.4	多层纤维织物	169
13.5	应用举例——细纱机钢领干摩擦磨损	174
13.6	材 料	175
第十四章 纺织工艺过程中的摩擦和磨损问题		
14.1	并条牵伸工艺中的摩擦和磨损问题	177
14.2	细纱加捻卷绕工艺中的摩擦和磨损问题	181
14.3	织造过程中综眼的摩擦力	184
参考文献		

第一章 绪 论

摩擦学包括两部分内容，即摩擦磨损与润滑。本书所涉及的内容是关于摩擦磨损方面的问题，也是摩擦学的主要内容之一。

虽然在很多情况下可通过润滑来减少机器和设备的磨损，提高其使用效率，但润滑并不是在任何情况下都能采用并取得预期效果的。例如农业机具与土壤的摩擦就很难采用润滑方法。而且绝大多数机械即使在润滑条件下也会发生磨损。由于频繁的起动和停车、载荷的变动、维护方面的缺陷、环境污染等等原因，不可能保证摩擦副总是处在完全液膜润滑的良好状态，也就不可避免地造成一定程度的磨损。另一方面，在不少场合中，我们所希望的倒是增大摩擦，但又要求减少磨损，例如刹车机构、轮胎、铁道运输的轮轨、摩擦传动、印刷机械等，日常生活中的这类事例也不少，例如鞋底、衣服等。

磨损是一种长时间的破坏过程，它不象断裂那样突然出现。因此长期以来并未得到应有的重视，也没有把设备的提早破坏和报废看作是一种事故，而却看成是一种不可避免的自然耗损。因此，摩擦学这门学科从最早的库伦（Coulomb）摩擦定律（1780年）算起到现在已有200多年的历史，而发展却是非常缓慢的。完全可以想到，利用现有摩擦学方面的知识，就能使设备利用率和可靠性大大提高，人们一旦认识到它的经济效果，发展和研究的速度就会加快。最近几十年，随着各项科学技术的迅速发展，在一些发达的工业国家已经开始重视了这方面的研究，并作出了显著的成果。特别在航空、核工业、交通运输等方面都取得了引人注目的效益。

要想取得一定的工程应用效果，首先要重视基础研究。摩擦学的研究比较复杂，费用也高，特别是关于机理方面的探讨和实验研究更是如此，要涉及到许多学科的知识 and 新的实验装置。目前在国内出版的书刊中有关摩擦学方面较为系统的著作还不多，本书内容主要涉及到摩擦磨损的基本理论和实验方法。通过本书可对摩擦磨损中的现象、性质、影响因素以及实验原理有较为系统的理解。并为进一步开展有计划的针对性研究打好基础。

1.1 磨损形式

要给磨损下一个确切的定义还比较困难，因为如果强调一种机理往往就会忽视其它机理。大体上可以认为是“在物体作相对运动时，由于相互作用造成物体表面材料的逐渐耗损或残余变形”。按照磨损的机理主要可分为下述几种类型：粘着磨损；磨料（粒）磨损；疲劳磨损；腐蚀磨损；微动磨损和浸蚀磨损。

粘着磨损：由于粘着作用使材料由一表面转移到另一表面所引起的磨损，称为粘着磨损。

磨料磨损：由硬颗粒或硬的微凸体引起材料破坏，分离出磨屑的磨损，称为磨料磨损。

疲劳磨损：材料微观体积受循环接触应力作用，产生重复变形，导致裂纹和分离出微

片或颗粒的磨损，称为疲劳磨损。

腐蚀磨损：以化学或电化学反应为主的磨损称为腐蚀磨损。

微动磨损：两接触表面由于受相对低振幅振荡运动而产生的磨损称为微动磨损。

浸蚀磨损：含有硬颗粒的流体相对固体运动，使固体表面产生的磨损，称为浸蚀磨损。

在实际情况下，很难找到一种单纯的磨损形式，绝大多数情况下都是多种机理同时存在的，不过往往其中有一种或两种机理起主导作用。

1.2 实验方法

为了测量磨损，实验室所采用的实验方法大体上可分为两大类，即简单试验和模拟试验。第一类是采用简单的几何形状进行材料的对比试验，必要时进行严格控制下的精确试验，以便对机理进行研究和探讨。这一类试验与实际情况下的磨损没有直接关系。最常用的一种简单形式是圆柱销-圆盘试验机，简称销-盘试验机。固定销是待测的磨损试样，在法向载荷作用下与转动圆盘的平面发生接触，作用载荷与圆盘转速可根据要求进行调整，可用各种压力下的磨损量作材料的对比试验。通过下面任何一种方法可以测量出销的磨损量。

- (1) 销的失重量与时间的变化关系。
- (2) 销的高度改变量与时间的关系。
- (3) 在滑动过程中每隔一定时间测量一次销端部的磨损直径。为使测量准确，常将销受磨损的一端做成圆锥形或半球形。

另一种简单形式为交叉圆柱试验机。用一个固定不动的小圆柱作为待测磨损的材料试样，使其在载荷作用下和另一个与其相交成为 90° 的旋转圆柱进行摩擦，其磨损痕迹在试样上呈椭圆形，测量椭圆长轴的尺寸就可以代表磨损量。

除上述常用的简单试验机以外，还有许多其它型式的磨损试验机，如销-环式试验机、四球机等。这些试验机更具体的情况均在有关章节中作了说明。

严格控制实验环境的精密试验，如在超高真空条件下的圆销-圆盘试验机，当测量宇宙空间环境中的磨损时，试样经机械加工后必须电抛光并用电子轰击法进行清理，然后在超高真空条件下进行试验。此外，还可采用放射性同位素等方法精确地测量磨损量。

第二类是采用模拟方法进行试验。为了研究与实际情况条件下相似的磨损问题可进行模拟试验。所模拟的条件往往是实际情况可能遇到的最不利的那些条件。如模拟齿轮啮合中存在的滚动和滑动条件时，常利用圆盘试验机。用两个圆盘在载荷作用下进行对滚，当两个圆盘的线速度相等时为纯滚动；不相等时为既有滚动也有滑动的情况，速度可以按照要求进行调节。

用圆柱销-圆盘试验机时，如圆柱销的末端为圆锥、半球形，其磨损体积可用磨损后所测得的磨痕尺寸按下表所列公式进行计算。

大多数磨损试验机同时也可用于测量摩擦力和摩擦系数。测量摩擦系数和摩擦力比测量磨损简单得多，测量静摩擦系数最简单的方法是用一个可倾斜任意角度的平板，把重物放在上面，当倾斜角 θ 达到一定程度后重物就自动向下滑动。这时摩擦系数为 $f = \tan \theta$ 。当

然要测量连续运转情况下的摩擦就不能采用这种方法。

表 1.1 用磨痕尺寸计算磨损体积 (V)

装置型式	试件	体 积 (V)	备 注
圆盘-圆锥销	圆锥	$(\frac{\pi}{24}) d^3 \operatorname{ctg} \theta$	θ —圆锥半顶角 d —磨损伤痕直径
圆盘-半球形端圆柱销	半球形末端圆柱	$(\frac{\pi}{64R}) d^4 [1 + (\frac{d^2}{12R^2})]$	R —半球形半径 d —磨损伤痕直径
交叉圆柱	小圆柱	$(\frac{\pi}{64R}) (\frac{a}{R})^{1/2} d^4 [1 + \frac{d^2}{16R^2} (7 - \frac{R}{a})]$	a —小圆柱半径 R —大圆柱半径 d —小圆柱上椭圆形磨痕长轴

在连续运转条件下，要研究摩擦力的变化情况时，可把固定试件安装成允许它能够作微小的切向位移，例如交叉圆柱试验机中的小圆柱试样。我们可以把这个试样安装在一个片状弹簧上，片弹簧可沿切向力方向作微小的位移。结果是切向位移愈大，弹簧位移量愈大，摩擦力也愈大，因此可以把位移量标定成摩擦力。微小位移可用电容法或电感法测出并连续地记录下来。

第二章 摩 擦

摩擦阻力会造成系统能量的无效损耗，所以常常要设法减小它。例如，一金属轴在金属轴承中运转是不合适的，因为这会导致两表面的破坏甚至咬死，采用润滑剂可以把轴与轴承分开，以形成低的摩擦系数，这对提高机械效率和经济效益都是重要的。当速度和载荷提高时，摩擦副材料的选择和采用适当的润滑剂就更为重要。我们知道密排六方晶系金属由于其易于沿基面（滑移面—0001晶面）滑动，摩擦阻力低，而为人们所希望。石墨轴承是一种大家所熟知的不需再另行润滑的组件。面心立方晶格的金属滑动时会立即硬化，因此这种材料制成的轴颈与轴承在微凸体接触点处将会发生粘着或冷焊，界面也会咬死，甚至具有润滑条件的机构也必须避免采用这种材料组合，因为在边界润滑状态时仍可能发生金属直接接触。摩擦虽然白白地造成很大的能量损失，但另一方面，人们也应注意它的积极作用。例如我们的脚或鞋底同路面之间若没有摩擦，那么要走路将是不可能的，就一个理想的动力系统如汽车来讲，最好是具有完全没有滑动或滚动摩擦的界面，而实际界面上必定有使其趋于停止的摩擦存在。一个闸瓦的功能主要表现在它的摩擦性能方面。在构件相对运动中，摩擦可以造成损耗和损伤，但在另一些条件下我们必须利用摩擦。因此，从摩擦学观点来了解摩擦问题就十分重要。到目前为止，在金属的摩擦和磨损之间还未建立起一个公认的定量关系，因为这方面的问题是十分复杂的。

2.1 摩擦定律

Leonardo da Vinci (1452~1519) 最早建立了摩擦的基本概念。后来，Amontons (1663~1705) 进行了摩擦试验并建立了摩擦的基本公式。随后，Coulomb (1736~1806) 也进行了同样的试验。所谓的古典摩擦定律也称为 Amontons-Coulomb 定律，古典摩擦定律只适用于滑动摩擦的情况，其基本内容有：

- (1) 摩擦力 F 的大小与接触面积间的法向载荷 W 成正比。

$$F = \mu W \quad (2.1)$$

式中， F ——摩擦力； μ ——摩擦系数； W ——法向载荷。

- (2) 摩擦力大小与名义接触面积的大小无关。
- (3) 摩擦力大小与滑动速度无关。
- (4) 静摩擦力大于动摩擦力。

在古典摩擦定律中，摩擦系数 μ 是一个常数。这对于在空气条件下一般来讲基本上是正确的。但通过更多的试验后可知，对于不同材质的金属摩擦副，其摩擦系数是不同的，表 2.1 列出 Rabinowicz 所提供的关于不同金属在干摩擦时的摩擦系数，可以看出摩擦系数 μ 并不代表一种材料的固有特性，它主要取决于组成摩擦副的材料与环境条件。这是因为在摩擦过程中界面间会产生某种能降低摩擦的中间金属化合物，这一点以后还要

表 2.1 不同金属在干摩擦时的摩擦系数

	W	Mo	Cr	Co	Ni	Fe	Nb	Pt	Zr	Ti	Cu	Au	Ag	Al	Zn	Mg	Cd	Sn	Pb	In
In	1.06	0.73	0.70	0.68	0.59	0.64	0.67	0.79	0.70	0.60	0.67	0.67	0.82	0.90	1.17	1.52	0.74	0.81	0.93	1.46
Pb	0.41	0.65	0.53	0.55	0.60	0.54	0.51	0.58	0.76	0.88	0.64	0.61	0.73	0.68	0.70	0.53	0.66	0.84	0.90	
Sn	0.43	0.61	0.52	0.51	0.55	0.55	0.55	0.72	0.55	0.56	0.53	0.54	0.62	0.60	0.63	0.52	0.67	0.74		
Cd	0.44	0.58	0.58	0.52	0.47	0.52	0.56	0.59	0.50	0.55	0.49	0.49	0.59	0.48	0.58	0.55	0.79			
Mg	0.58	0.51	0.52	0.54	0.52	0.51	0.49	0.51	0.57	0.55	0.55	0.53	0.55	0.55	0.49	0.60				
Zn	0.51	0.53	0.55	0.47	0.56	0.55	0.58	0.64	0.44	0.56	0.56	0.47	0.58	0.58	0.75					
Al	0.56	0.50	0.45	0.43	0.52	0.54	0.50	0.62	0.52	0.54	0.53	0.54	0.57	0.57						
Ag	0.47	0.46	0.45	0.40	0.46	0.49	0.52	0.58	0.45	0.54	0.48	0.53	0.50							
Au	0.46	0.42	0.50	0.42	0.54	0.47	0.50	0.50	0.46	0.52	0.54	0.49								
Cu	0.41	0.48	0.46	0.44	0.49	0.50	0.49	0.59	0.51	0.47	0.55									
Ti	0.56	0.44	0.54	0.41	0.51	0.49	0.51	0.66	0.57	0.55										
Zr	0.47	0.44	0.43	0.40	0.44	0.52	0.56	0.52	0.63											
Pt	0.57	0.59	0.53	0.54	0.64	0.51	0.57	0.55												
Nb	0.46	0.47	0.54	0.42	0.47	0.46	0.46													
Fe	0.47	0.46	0.48	0.41	0.47	0.51														
Ni	0.45	0.50	0.59	0.43	0.56															
Co	0.48	0.40	0.41	0.56																
Cr	0.49	0.44	0.46																	
Mo	0.51	0.44																		
W	0.51																			

可以看出，相同材料在一起相对滑动时将产生一种高的静摩擦系数 μ 值。我们知道吸附气体可能降低摩擦阻力，同一摩擦副在真空条件下其 μ 值可能增加一个或两个数量级。当其它条件都相同时，在古典摩擦理论中，摩擦力的大小与名义接触面积的大小无关。对于金属材料来说，由于摩擦副表面总是粗糙的，仅在很小接触区域内才有真正的接触，所以说摩擦力大小与名义接触面积无关。试验表明，实际接触面积与摩擦系数有关，随着实际接触面积的增加，摩擦系数增大，摩擦力也增大。例如对于光滑表面，摩擦力将由于表面光洁度的提高，随实际接触面的增大而增大，对于很洁净、很光滑的表面，接触表面之间出现强烈的分子吸引力，摩擦力与实际接触面成正比，并且和表面的外形无关。

古典摩擦理论中曾指出摩擦力的大小与滑动速度无

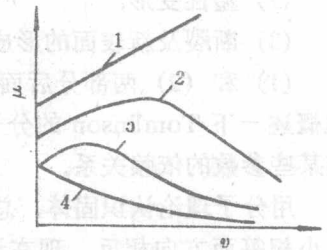


图 2.1 不同单位载荷下，滑动速度与摩擦系数的关系

- 1—轻载；2—较低中等载荷；
- 3—较高中等载荷；4—重载

关，这一结论仅在有限的速度范围内成立，这个范围随摩擦副材料不同而异，例如钛与钛的滑动速度是由 10^{-10} 到 1 m/s 。实验表明，对于多数材料，摩擦系数与滑动速度有关，随着滑动速度增加，摩擦系数将会降低（见表 2.2），当界面间滑动速度提高到某一数值，摩擦系数会急剧下降。这是因为在接触点处出现了初熔现象，它提供了一层粘性润滑剂，从而出现了低摩擦。另外在不同的单位载荷下，滑动速度和摩擦系数的关系也有所不同（图 2.1）。

表 2.2 摩擦系数与滑动速度的关系

试样材料	铜			铁		3号钢			30CrMo 钢	经热处理的 10Gr11Ni20Ti3 合金钢
	135	250	350	140	330	150	250	350	140	350
滑动速度 v , m/s										
摩擦系数 μ	0.056	0.04	0.035	0.063	0.027	0.052	0.024	0.023	0.055	0.024

2.2 分子理论

虽然古典摩擦定律给我们提供了研究干摩擦的重要方向。但我们知道在载荷作用下两个表面是结合在一起的，要把它们分开需要一个一定大小的力。现在很容易验证这个问题，从而可说明摩擦结合力是如何形成的。

首先我们应认识到不是所有输入物体的能量都可以作有用功，就是说由于界面上的阻力，使总能量中的一部分不是用于作有用功。无用功将消耗在摩擦界面间存在的以下一种或几种现象方面。

- (1) 弹性滞后；
- (2) 塑性变形；
- (3) 断裂及新表面的形成。

(1) 和 (2) 两部分后面还要详细讨论，断裂包含在微凸体变形之内。首先，让我们先概述一下 Tomlinson 的分子理论，因为在半个多世纪之前它已建立了类似现行的摩擦与某些参数的依赖关系。

用分子理论认识固体，总是从平衡状态开始，即认为固体内部原子之间的引力与斥力大小相等而方向相反。现在设想使一个物体与另一物体逐渐接近，如果达到足够小的距离，则原子间的斥力将占优势而使表面趋于分离，它的作用相当于摩擦阻力的作用，将消耗掉给系统一定的外加能量。我们知道，实际上表面是粗糙的，因此一个表面只有一部分与另一表面的一部分足够接近。这可以用一个在载荷作用下的粗糙表面的许多微凸体趋近并且压入另一个光滑表面来比拟。但在上述模型中，微凸体峰部的原子被平滑表面所排斥，并没有压入作用。斥力是对摩擦的一种度量，麻烦的问题是还没有讲明对表面是如何造成破坏的。按照第三章所讲，分子理论认为磨损是由于原子从表面的剥离，使表面形貌

发生了变化。Tomlinson 所提出的模型关于运动的摩擦阻力是很简单的。它只是由于一组原子趋近到另一组原子的斥力场所引起的现象。

设一摩擦副的界面受到法向载荷 W 作用，引力的和为 $\sum F_A$ ，相互接近时原子间斥力的和为 $\sum F_R$ ，则平衡式为

$$W + \sum F_A = \sum F_R \quad (2.2)$$

对于实际的摩擦副来讲，物体原子间的引力同施加于界面的载荷相比可忽略不计，故上式为

$$W = \sum F_R \quad (2.3)$$

该模型是当两个物体接近时每个表面各有一个原子的一对原子间有斥力作用的情况，式 (2.3) 描述了静态的条件，但也适用于滑动情况，在运动时两个表面相对间的位置不断改变，故原子对也是不断变换的，其相互间的斥力仍然等于 $\sum F_R$ 。

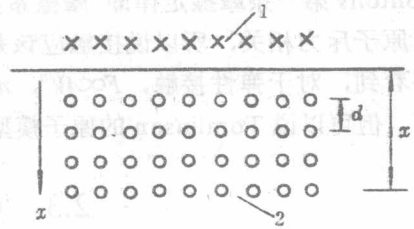


图 2.2 摩擦的原子模型
1—上表面原子；2—下表面原子

假定，由于斥力的作用每对原子相遇一次的能量损失为 E ，其值等于一对相接近的原子所提供的摩擦阻力。设这些原子间的中心距离为 d ，上表面的原子已穿入下表面，穿入距离 x (图 2.2)。

若平均斥力为 p ，在载荷 W 作用下原子接触对数为 n 则

$$W = np \quad (2.4)$$

若上表面向下移动一个距离 x ，则原子对被分离的总次数

$$N = n (x / d) \quad (2.5)$$

图 2.2 是理想化了的模型，实际上原子对能够被分离是一个概率问题。设 α 为其相遇的概率，则

$$N = \alpha \frac{nx}{d} \quad (2.6)$$

两边均乘以 E

$$NE = \alpha \frac{nx}{d} E \quad (2.7)$$

穿透距离 x 时所做的功为

$$\mu Wx = NE \quad (2.8)$$

式中， μ 是摩擦系数，代入式 (2.7) 得

$$\mu = \alpha \frac{nE}{dW} \quad (2.9)$$

将式 (2.4) 的 W 代入得

$$\mu = \alpha \left(\frac{E}{dp} \right) \quad (2.10)$$

假定一个原子由其原先的平衡位置被移动进入另一原子斥力场，则这个原子将总是企图返回到它原来的平衡位置。设返回原来平衡位置所经过的距离为 l ，如果一对原子间的平均内聚力是 E_c ，则

$$E_c l = E$$

把 E 代入式 (2.10) 得

$$\mu = \alpha \frac{E_c}{p} \cdot \frac{l}{d} \quad (2.11)$$

一对特定原子在平衡状态时的间距 d 是固定的。距离 l 是未知数，但 l/d 是一无量纲量。实际上 α 是界面上原子相遇的概率，和顶峰上原子的统计特性相一致。 E_c 和 p 与所研究材料的弹性常数有关。

式 (2.11) 未包括法向载荷，即摩擦系数不取决于所施加的法向载荷，这与 Amontons 第一条摩擦定律即“摩擦系数与法向载荷无关”是一致的。由于 Tomlinson 的模型与原子斥力相关，所以说接触应该是弹性的。其实质是摩擦阻力与载荷 W 成正比。后面将看到，对于弹性接触， $F \propto W^n$ ， n 从 0.8 到 0.96。虽然我们对摩擦和磨损的理解还不全面，但可以说 Tomlinson 的原子模型对现有理论起了先导的作用。

2.3 剪切及犁沟作用

Bowden 和 Tabor 的理论有两个主要的论点：即粘着和犁沟作用。为了将剪切力与犁沟力分开，从考虑不同几何形状的硬滑块与较软金属的平表面间的摩擦力入手较为方便。现设有一较硬的半球形滑块置于软金属平面上，其本身重量忽略不计（图 2.3 (a)）。当施加于滑块上载荷 W 大到能使软金属屈服时就会形成一个结点（图 2.3 (b)），滑块也就粘在平面上。若作用一个切向力 F ，当力 F 超过结点处的粘着力时，滑块就会产生移动（图 2.3 (c)）。当滑块作水平移动时，若不考虑材料的侧向扩大，滑块就会在平面上推掉一定体积的材料，形成一个沟槽。目前认为，滑块沿表面平行移动所需的力将由两项组成，即

$$F = S + P \quad (2.12)$$

式中 S 是在两种金属紧密接触的点上所形成的金属结点被剪切时所需的剪切力， P 是使软金属从滑块前沿推开所需的犁沟力。

下面进一步讨论 S 和 P 。设半球形滑块在水平面上的碗状压痕面积的一半为实际接触面积，以 A 表示。在运动中由于塑性流产生的界面粘着具有的有效剪切应力为 τ ，则克服滑块和平面间的粘着力就等于其

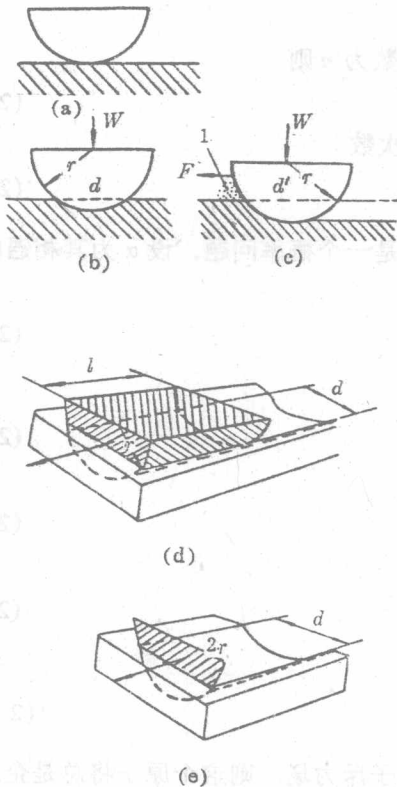


图 2.3 硬的弯曲表面使软金属平面变形
“ l ”表示聚集的磨屑

剪切力，即

$$S = A\tau \quad (2.13)$$

P 等于犁沟轨道的横截面积乘以推开表面上金属所需平均压力，若已知被推动金属的屈服应力为 σ_y ，设轨道宽度为 d ，滑块曲率半径为 r ，则轨道横截面积将近似地等于

$$\frac{1}{12} \cdot \frac{d^3}{r}, \text{ 从而得}$$

$$P = \left(\frac{d^3}{12r}\right) \sigma_y \quad (2.14)$$

此外在摩擦副中可以认为在两个构件中是较软的一个首先屈服并粘结在另一硬表面上，因而较软的构件材料决定着法向载荷所产生的界面强度，这样考虑简单且实用。但实际界面间的情况要复杂得多，如表面状态、材料的转移和工作硬化等现象会必然影响到结点的剪切强度。

注意到犁沟分量 P 仅提供了引起该部分球面积屈服所需的力。此外还有堆积的磨屑引起的阻力一项，除非将该项设法除去，例如滑块运动时将其刮去。总摩擦阻力为

$$F = A\tau + \left(\frac{d^3}{12r}\right) \sigma_y \quad (2.15)$$

如果我们考虑的是一个锥形微凸体，其半锥角为 θ ， d 为压痕面积直径，则犁沟项为 $\left(\frac{d^2}{4}\right) \text{ctg}\theta \cdot \sigma_y$ 。

可以看出，在上述两种情况下主要的几何特征参数为 d ，它随着压痕深度而增加。因此具有低屈服应力的材料，在法向重载作用下，对于球形和锥形的滑动件，将具有较大的 d 值。因此犁沟项将随着材料变软而相应的增大，此时 σ_y 值也是很小的。

还可考虑另一种类型的滑块，例如半径为 r ，长度为 l 的半圆柱体滑块（图 2.3 (d)）。在这种情况下，显然剪切项 S 等于压入金属中的曲面的表面积乘以 τ 。通常它与投影面积 ld 乘以 τ 的值相差不大。犁沟项将等于半圆柱体前沿部分压入的面积乘以 σ_y ，因此上式可近似地写成

$$F = ld\tau + \frac{d^3}{12r} \sigma_y \quad (2.16)$$

如果认为半圆柱体的长度等于零（即滑块为半圆形的平铲），则可消去剪切项。这样，剪切项为零，则运动阻力完全来自犁沟项，故

$$F = \frac{d^3}{12r} \sigma_y \quad (2.17)$$

此式与式 (2.15) 和 (2.16) 中的犁沟项是相同的，因此，若式 (2.15) 或式 (2.16) 减去式 (2.17) 便可得出半球体滑块和半圆柱体滑块的剪切项 S 。用这个简单方法可分别求得总摩擦力中的剪切项与犁沟项。

在上述分析中，剪切力 S 和犁沟力 P 之间可能有相互作用存在，凡影响 S 的那些因素也可能影响 P 。因此将剪切和犁沟两项分离，认为它们是相互独立的参数是不完全正确的。但若考虑到所有这些影响时，摩擦的数学分析事实上是难处理的，而 Bowden 和 Tabor 的理论只是对大多数情况而言。若忽略犁沟项 P ，则摩擦阻力为

$$F = A\tau \quad (2.18)$$

2.3.1 摩擦系数

按照定义, $\mu = F/W$. F 由式 (2.18) 给出, 未考虑犁沟项, $W = A\sigma$, σ 为面积 A 上的压应力, 故.

$$\mu = \frac{A\tau}{A\sigma}$$

或

$$\mu = \frac{\tau}{\sigma} \quad (2.19)$$

式 (2.19) 与 Amontons 第一条定律相一致, 该定律表明摩擦系数与施加的法向载荷无关. 对界面间的剪切强度不易作出正确的估计, 若取 $\tau = \tau_c$, τ_c 是屈服材料的临界剪切应力, 则式 (2.19) 可改写为

$$\mu = \frac{\tau_c}{\sigma} \quad (2.20)$$

滑块下面应力是相当复杂的, 但可以简述为: 界面间总应力的约 2/3 呈液体静压形式, 它不造成金属屈服. 其余部分即 1/3 可引起塑性流动, 因此

$$\sigma_c \approx \frac{\sigma}{3} \quad (2.21)$$

根据塑性理论, $\tau_c = \sigma_y / 2$. 故式 (2.20) 可以重写为 $\mu = (\sigma_y / 2) / (3\sigma_y)$; 即 $\mu = 0.17$.

大多数金属副在大气环境中为干滑动条件时滑动摩擦系数约为 1, 而上面论证的结果为 $\mu \approx 0.2$, 故需要修改, 并要考虑结点增长现象.

2.3.2 结点的增长

如前所述, 单个滑块与平面形成一个界面面积为 A 的结点 (图 2.3 (b)). 如果在卸载之后结点完全消失, 则属于弹性接触的结点. 若为塑性接触时, 则滑块与平面的粘结时间将很长.

实验表明, 法向压力和所作用的切向拉力的综合效应一般能沿着运动方向增大结点的面积, 这时只是在结点区域内上表面相对于下部物体作微观位移, 尚未发生整体滑动作用. 在平试样上利用球形滑块并保持法向载荷不变时, 已通过多光束干涉法观察到结点界面的微观移动现象. 显然, 随着作用的切向力慢慢增加, 结点面积将逐渐增大. 随着微观位移量增加, 瞬时摩擦系数 μ_i 也相应地增加. 在整体滑动开始时, 结点面积已增加到一个最大的稳定值, 这时的摩擦系数 μ 称为静摩擦系数. 结点增长的屈服准则是.

$$\sigma^2 + \alpha\tau^2 = \sigma_y^2 \quad (2.22)$$

式中, σ 是作用的法向应力; τ 是切向应力; α 是接近于 10 的一个常数; σ_y 是形成结点材料的屈服应力. 当结点面积单调增加时, 需要分阶段地检验式 (2.22). 最初 $\tau = 0$, 不能应用屈服准则. 当 σ 取非零值时, 某些微凸体发生屈服并形成结点, 界面间潜在的摩擦系数值 $\mu_i < \mu$. 当 τ 增大到某值时, 随着结点尺寸的增加, 按式 (2.22) σ 值将会减小. 因此, 为了满足塑性条件, 随着面积的增加和 σ 的减小 τ 必然增大, 这种情况一直持续到 τ 增大至足以克服静摩擦力并开始整体滑动为止. 这种情况的条件是当一个微凸体被压平