

金属磨损原理

JIN SHU MO SUN YUAN LI

〔英〕 A. D. 萨凯 著

煤炭工业出版社

金属磨损原理

〔英〕 A. D. 萨凯著

邵荷生译

煤炭工业出版社

内 容 提 要

本书主要介绍金属（也涉及到一些重要的非金属如塑料）的摩擦和磨损机理，介绍了在这一领域内近代的研究方法和重要的成果。书中还叙述了某些常用的机械制造材料，如钢、铸铁、黄铜、铝等的摩擦磨损特性，分析了机器元件的各种磨损方式。原书在1976年出第一版，是介绍近代摩擦学中除润滑问题以外内容的一本较新著作，是高等学校的教学参考书，对机械制造行业，也包括矿山机械部门很有参考价值。

A D Sarkar

WEAR OF METALS

Pergamon Press Ltd England 1976

*

金 属 磨 损 原 理

邵荷生 译

*

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平北路16号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$

印张 $6 \frac{1}{2}$

字数 138 千字

印数 1—10,120

1980年10月第1版

1980年10月第1次印刷

书号 15035·2330

定价 0.70元

序 言

目前, 世界各地对金属和材料的磨损都怀着莫大的兴趣。本人大胆写成此书, 主要是为了供高等学校学生之用, 但也希望其中讨论专用材料磨损的一些章节对新研究工作者也有用。本书一般仅探讨原理, 只在阐明原理时才提到某些特定条件下的专用材料。写书时设想读者已具有冶金学及工程原理方面的基本知识。

磨损的先决条件, 是两表面间的相互作用。因此第二章讨论表面形貌。磨损离不开摩擦, 因此在第四章讨论摩擦, 在此以前, 在第三章先分析了接触力学。摩擦学的接触既是弹性的, 也是塑性的, 在第五章中将突出地说明塑性焊合的接点的形成。第八章为粘着磨损理论, 它前面的第六章和第七章则为汤姆林逊的研究工作及跑合磨损。第九章和第十章为由于氧化物和表面沾染物质引起的磨损理论。第十一章为磨粒磨损, 有几章述及了金属转移、晶体结构的作用、滚动阻力及滚动磨损等方面。关于微动磨损的有用文献, 则和某些重要的工程材料如铸铁和铝硅合金一起讨论。聚合物的摩擦和磨损的内容是按对比方式写的, 最后一章概括了某些其它类型的磨损, 并指出一个减少磨损的近似设计方法。有些优秀的教科书提供了有关摩擦零件的材料和制造工艺的详细情况, 在本书的二十二章中也举出其中一些范例。

因为涉及范围广泛, 所以将数学符号统一起来是有困难的。但是, 每个符号的意义都已在本书的符号出现处加以说明。

A. D. 萨凯

35445

目 录

序 言

第一章 引论	1
1.1 粘着	1
1.1.1 接触电阻	1
1.2 沾染物质	2
1.3 磨损的类型	2
1.3.1 粘着磨损	3
1.3.2 磨粒磨损	3
1.3.3 其它类型的磨损	3
1.4 摩擦和磨损试验	3
1.5 冶金学方面的研究	7
1.6 磨损研究结果的应用	8
第二章 表面形貌	11
2.1 微凸体	11
2.2 波形的测量	12
2.3 微凸体的角度	14
2.4 粗糙度的测量	14
2.5 实度或空度	15
2.6 艾伯特(Abbot)支承曲线	16
第三章 固体的接触	18
3.1 单点接触	18
3.1.1 一般情况	19
3.2 多点接触	20
3.3 理想的粗糙表面	20

3.4 实际的粗糙表面	22
3.4.1 指数分布	24
3.5 塑性接触	24
3.6 冷工硬化的影响	25
第四章 摩擦	29
4.1 接触面积	29
4.2 接点的粘着	30
4.3 摩擦机理	34
4.4 艾芒通定律	36
第五章 滑动的效应	38
5.1 接点的生长	38
5.1.1 接点生长方程	39
5.2 粘着功	39
5.3 动摩擦	42
5.4 粘-滑过程	42
5.5 热效应	45
5.6 氧化膜	46
5.7 脆性表面间的滑动	47
5.8 沾染物质对摩擦的影响	48
第六章 摩擦和磨损的分子理论	51
6.1 干摩擦	51
6.2 磨损	54
第七章 跑合磨损	56
7.1 磨损曲线	56
7.2 机理	56
7.3 跑合磨损定律	57
第八章 粘着磨损	60
8.1 磨损率	60
8.2 接点的相互作用	61
8.3 粘着磨损定律	63

8.4 微凸体的角度	64
8.4.1 半球形微凸体	67
8.5 疲劳机理	67
8.5.1 滑动表面间的接触	68
8.5.2 磨损定律	69
第九章 磨损的氧化假说	73
9.1 氧化假说	73
9.1.1 β 项	73
9.2 对方程9.7的解释	75
第十章 表面沾染物质	76
10.1 不完全膜差	76
10.1.1 α 项	76
10.1.2 磨损方程的修正	77
10.2 吸附热理论	78
10.2.1 摩擦	79
10.2.2 磨损	80
10.3 E的重要性	82
10.4 简化了的定律	82
10.4.1 例子	83
第十一章 磨粒磨损	85
11.1 磨粒磨损系数	85
11.2 耐磨粒磨损性	87
11.3 界面上的磨粒	88
11.4 贮存的能量	88
第十二章 磨屑	91
12.1 能量上的考虑	91
12.2 磨屑的大小	92
12.3 载荷的影响	94
第十三章 金属的转移	96
13.1 钢在黄铜上摩擦	96

13.2	钢在钢上摩擦	98
13.3	转移量	99
第十四章	表面和表面下层	101
14.1	表面和表面下层	101
14.2	摩擦	101
14.3	表面疲劳	102
14.4	塑性指数	102
第十五章	温度和速度	105
15.1	温度	105
15.2	速度	107
第十六章	溶解度	111
16.1	溶解度	111
16.1.1	耐划伤性	111
16.1.2	在真空中工作	113
16.1.3	切削和滑动同时进行的表面	113
第十七章	晶体结构	116
17.1	粘着系数	116
17.2	用钻实验	117
17.2.1	温度的影响	118
17.3	稀土金属材料	118
17.4	纹理的改变	119
第十八章	滚动阻力	120
18.1	滚动原理	120
18.2	滑动	121
18.2.1	雷诺滑动	122
18.2.2	汉斯柯特滑动	122
18.3	塑性范围内的滚动	122
18.3.1	滚道宽度	123
18.3.2	滚动摩擦	123
18.3.3	平衡状态	125

18.4 在弹性状态中的滚动	126
18.4.1 滞后现象	127
18.5 调整极限	127
18.5.1 滚动时前沿的应变	129
第十九章 滚动接触下的磨损	131
19.1 滑动面积	131
19.2 磨损	132
19.3 滚动磨损定律	133
第二十章 聚合物	136
20.1 摩擦和磨损	136
20.2 摩擦的一般定律	138
20.3 橡胶	140
第二十一章 微动磨损	143
21.1 微动磨损的四个阶段	143
21.1.1 虫形纹	145
21.2 麻点深度的测量	146
21.3 载荷和湿度	147
21.4 湿度	149
第二十二章 摩擦学零件的实例	151
22.1 齿轮	151
22.1.1 滑动速度	151
22.1.2 滚动速度	153
22.1.3 摩擦和磨损	153
22.1.4 点蚀	155
22.2 轴承	155
22.2.1 普通轴承	155
22.2.2 滚动轴承	156
22.3 活塞环	157
22.4 冲击条件下的磨损	158
第二十三章 黄铜的磨损	160

23.1	重量磨损和滑动距离的关系	160
23.2	磨损率	161
23.3	转变载荷	164
第二十四章	石墨和碳化物的摩擦和磨损	168
24.1	石墨	168
24.2	碳化物	170
第二十五章	铸铁的磨损	172
25.1	石墨的作用	172
25.2	硬度	173
25.3	有润滑时的滑动磨损	175
25.4	无润滑时的滑动磨损	178
25.5	结论	180
第二十六章	铝硅合金的磨损	183
26.1	硅对磨损的影响	183
26.2	套筒的变形	184
26.3	物理模型	186
26.4	磨损率	188
第二十七章	耐磨性设计	190
27.1	疲劳磨损	190
27.2	侵蚀磨损	191
27.3	气蚀	191
27.4	耐粘着和磨粒磨损性的设计	193
27.4.1	防护层	193
27.4.2	置换原理	194
27.4.3	转移原理	194
27.5	磨损的重要性	194

第一章 引 论

假使文明的组成部分之一是人类能使用技术的话,那么从新石器时代(约公元前3500年到1500年)的野蛮社会演变到近代社会的建立只不过2000到3000年^[1]。当时技术的进步要求做出预先设想好的金属和非金属零件,这些零件可能是狩猎用的长矛或运输用的轮车。最普通的摩擦学工具是贝壳、石头或兽骨制的钻头。事实证明,石头在中世纪(公元400~1400年)的欧洲是有效的耐磨材料,并曾用在犁铧或车轮的轮缘上。技术工作者经常意识到磨损的存在,并且探求了减少磨损或利用磨损为他们服务的基本知识。由于磨损的先决条件是配合的零件必须紧密地接触,所以工程师们总是企图在它们之间挤进润滑油,以使两表面分隔开来。

1.1 粘着

工程上用的表面是粗糙的,而且有尖峰和凹谷。因此当两固体之间发生接触时,实际的接触面积仅发生在少量孤立的点上,其面积是表观面积的一部分。因此在接触区内所受的法向应力是很高的,可能超过其中一个固体或同时超过两个固体的屈服点。因而接触面会互相焊住而形成接点。这些接点必须断开才能开始并保持相对运动,而接点断裂所需的力,就是度量摩擦力的标准。

1.1.1 接触电阻 当然,希望能用实验方法测得实际的接触面积,一个方法是测定两接触固体间的电阻。假设两固体A和B,其比电导各为 λ ,两者的接触面积是直径为 $2a$ 的

圆。若固体表面沾染物质是均匀的，并设其每厘米²的电阻为 σ 。这样，接点的总电阻 R 近似于：

$$R = \frac{1}{2a\lambda} + \frac{2\sigma}{\pi a^2} \quad (1.1)$$

要测定接触电阻，由于 R 比导线的电阻小，需用电流—电位法。假使环境是洁净的，则方程(1.1)中的第二项可以略去， a 值可用方程(1.1)算出。实际的接触面积也可以从显微镜中观察到，或间接从金属流动应力 σ_v 上得到，因为当垂直载荷为 W 时， $\pi a^2 = W/\sigma_v$ 。

1.2 沾染物质

当接点断裂时，可能出现磨屑，因此，为了防止磨损，必须尽一切办法来制止接点的形成。这可在界面上强加一保护层使其隔开，以阻止两金属物体接点上的金属原子相互作用。正巧，当表面暴露在室内大气中时，会迅速地蒙上一层或几层被吸附的气体或氧化物。在摩擦热的作用下很易产生氧化，而沾染物质则使许多表面上未润滑的系统减轻磨损。过热时会使被吸附的气体蒸发，而法向应力过高时也会使氧化层破坏，这样使得暴露出来的新生金属增加了磨损的倾向。

要想了解磨损，研究表面的形貌及其物理—化学性质是必不可少的。固体表面和表面下层的变形程度在摩擦和磨损的机理中起着重大的作用，因此，在分析机器运动链的磨损性质和磨损量时，必须研究接触应力及运动形式。

1.3 磨损的类型

任何时候，只要两个承载的物体作相对运动时，便存在磨损的潜在条件。广义地说，运动可以是单向的或往复的滑动或滚动，可以是滑动和滚动的复合运动。或者是由于小振幅振荡而产生磨损。金属可能与非金属或诸如润滑油或海水

等液体相互作用。根据在载荷下的运动性质或参加相互作用的介质的性质，有如下的分类：

1.3.1 粘着磨损 发生粘着磨损时其相对运动可以是在载荷作用下的、单向的或往复的滑动、或在小振幅振荡接触下的相互作用。众所周知，配合表面微凸体的尖峰发生塑性流动，并形成强固的冷工硬化接点。在外加的切向拉力作用下，接点断裂，就可能发生金属的损耗。

1.3.2 磨粒磨损 磨粒以磨屑形式，或以周围环境中的尘埃和砂砾等外来颗粒形式进入到滑动界面中去，金属的磨损基本上是由刨槽作用产生的。

1.3.3 其它类型的磨损 微动磨损是磨损的一种类型，它是在机器零件受振动时，两表面间的振荡运动而引起的。疲劳磨损是周期载荷作用的结果。滚动轴承因表层剥落而引起的材料损耗就是一例。侵蚀磨损是由砂砾冲击固体而引起的，而气蚀是零件在流体介质中旋转时发生的。

1.4 摩擦和磨损试验

虽然，在实际机器上进行试验所得到的磨损数据资料是可用的，但还要模拟实际情况所遇到的运动，在有控制的条件下进行实验室的研究。摩擦和磨损的结果常从同一机器设备中得到。

有许多机器可用来测算摩擦和磨损，这里概要地说明其中少数几种机器的原理。首先需要设计一摩擦副以提供摩擦界面。这可用一销钉装在加载杆上来实现，销钉的形状是棒形或半球形。加载杆设计成能承受垂直载荷，加载杆因销钉和其接触面间的摩擦阻力而发生的偏转能测量出来，并通过适当的标度来标明摩擦值。某些典型的原理如图1.1~1.4所示，图中销钉放在一个往复运动台上（图1.1）或在一套筒上

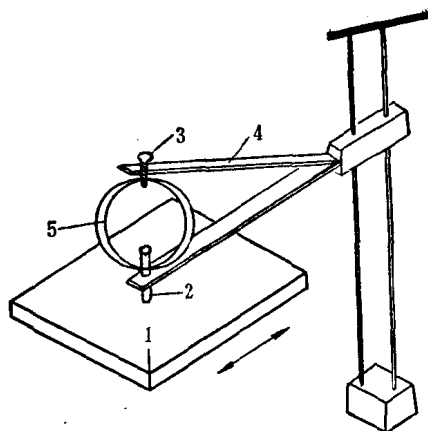


图 1.1 轻载荷摩擦测试仪(示意图)

(1) 能按箭头方向运动的平表面。销钉(2)装在圆环(5)上。垂直载荷是用螺钉(3)通过圆环加上的,而载荷是由圆环变形而估计出来的。水平方向的支架(4)装在双线的悬架上,和圆环(5)连接在一起,并测出摩擦阻力所引起的偏转

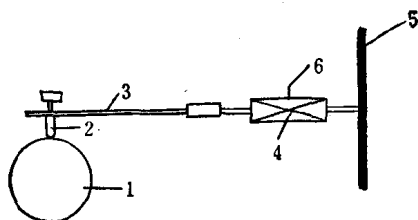


图 1.2 销钉套筒试验机

销钉(2)装在水平的加载杆(3)上,并在旋转着的套筒(1)上运动。加载杆装在弹簧(4)上,弹簧的另一端固定在刚性的支架(5)上。摩擦力使弹簧伸长。固定在弹簧上的针(6)可以与一位干磁场中的软铁相连。由于摩擦使针偏移引起铁芯的运动,结果使感应磁场强度发生变化。所得的信号可以放大或记录下来

(图1.2)。图 1.3 所示的销钉为圆柱形,并交叉放在另一较大的圆柱上。图 1.4 所示为一圆柱形或半球形销钉放在一旋转着的套筒或圆柱上。加载杆的偏转量可以用传感器或应变仪测得。

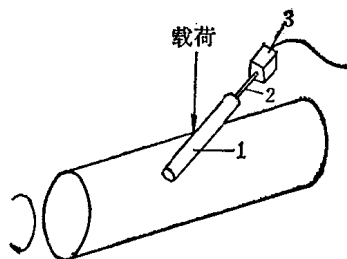


图 1.3

交叉的圆柱 (1) 装在弹簧 (2) 上。由于摩擦力而产生的运动被传感器 (3) 测出

摩擦和磨损也可用四球试验机或圆盘磨损试验机进行试验。前者原来用于评定润滑油的耐咬死性能,但它也可当作磨损试验机使用。将三个12.5毫米直径相接的钢球放在一圆

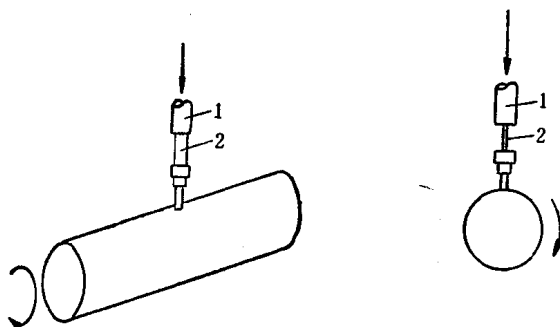


图 1.4

带有应变仪的加载杆 (1) 应变仪装在缩颈 (2) 上。由于摩擦力使杆弯曲,引起电桥电路的不平衡

环里,第四个钢球则固定在一垂直轴上并使它和下面三钢球接触。利用杠杆将一可调的载荷加在三个固定的钢球上使与第四个钢球压紧。当垂直轴旋转时,测出所传递的扭矩。整

个试验过程中的摩擦系数可记录下来，同时测出三球的磨损伤痕。

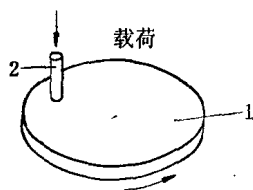


图 1.5 销钉—圆盘试验机
(1) 圆盘; (2) 销钉

圆盘磨损试验机是将一圆盘在载荷作用下贴着另一圆盘旋转，通常用来进行齿轮设计模拟研究。一个圆盘装在固定的轴承上，而另一个则支在可摆动的装置上。

销钉—圆盘试验机是常用的磨损试验仪器（图1.5），其中销钉受垂直载荷。垂直载荷、滑动速度、周围环境的大气和温度都是可变量。磨损量可在微量天平上称量销钉的重量来确定。整个磨损试验包括绘出滑动时间和重量损耗曲线，以得到跑合和稳定状态的磨损（如第七章图7.1所示）。重要的是工作要在化学净化的条件下进行，而这个方法是费时的。另一种方法是用一圆锥形的销钉，将它装在用铰链连接的加载杆上。销钉在盘上移动，当机器停车后，加载杆可以反转180°（图1.6），因而锥头磨损伤痕的直径可以测得，根据已知的圆锥角的大小，即可算出磨损体积。

图 1.3 所示的交叉圆柱结构也可用于磨损试验。圆柱形销钉上的磨损伤痕是椭圆形的，其长轴和短轴可用显微镜测得。哈林⁽²⁾证明，若磨损伤痕的深度小，且 $2r$ 为磨损伤痕椭圆的短轴直径，则磨去的金属体积 V 为：

$$V = \frac{\pi}{4} \left[\frac{r_s}{r_b} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot r \quad (1.2)$$

式中 r_s 和 r_b 各为旋转和固定圆柱的直径。

磨损试验机可以封闭在一小室内以便在可控气氛条件下作试验。若要使摩擦副完全脱离粘染物质，必须用 10^{-12} 托

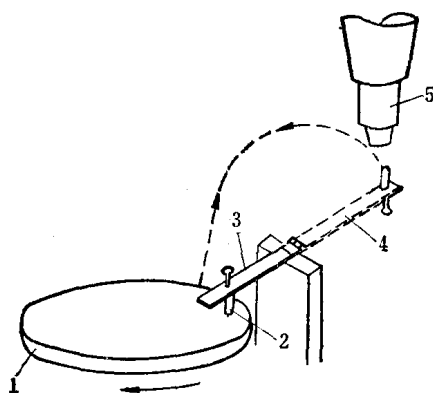


图 1.6 铰链连接的加载杆

(1) 圆盘; (2) 销钉; (3) 加载杆; (4) 加载杆转过180°, 用显微镜; (5) 测量磨损伤痕

的真空度。这是费用浩大的，而哈林⁽²⁾在车床上用切削刀具加工转动着的圆柱体以得到洁净表面的想法是巧妙和节约的方法。

1.5 冶金学方面的研究

表面纹理是一重要参数，第二章将讨论表面形貌以及应用表面轮廓仪以画出尖峰和凹谷。原来的金属表面由于变形和磨损的结果将继续发生变化，而这些变化可用光学和电子显微镜或立体扫描跟踪研究。除了显微镜显微硬度或电子衍射技术也能提供有价值的资料以外，观察表面下层的特性是重要的。不同金属在摩擦接触时会形成金属化合物，使表面或表面下层的成分发生改变。在销钉的斜截面上用微型探测器帮助确定化学成分是很有价值的，虽然这个化学成分也会受氧化的影响。常用X光衍射分析磨屑以得到有关一对摩擦副间冶金学上的相互作用资料。