

# 材料的摩擦性状

[英]伦敦大学 P. B. Madakson

## 1. 引言

对摩擦的详细研究, 开始于15世纪, 那时, Leonardo da Vinci 实验验证了摩擦力正比于施加的垂直载荷, 并与摩擦表面的面积无关<sup>[1,2]</sup>. 1699年 Amontons 再次发现了这两个定律, 从而使他的名字通常与这两个定律连在一起<sup>[3]</sup>. Coulomb 在1781年区别了两类摩擦<sup>[2]</sup>: 1) 静摩擦, 由开始滑动所需的力引起; 2) 动摩擦, 由维持滑动所需的力引起. 他还观察到动摩擦几乎与滑动速度无关. Coulomb 放弃了那种认为摩擦可能是由于摩擦表面的分子粘附而引起的想法, 而认为摩擦是由于表面微凸体的相互啮合所引起的, 摩擦力起因于把施加在这些不规则表面上的载荷抬起的作用<sup>[1,2]</sup>. 摩擦被认为部分地是由表面粗糙度和微凸体的啮合所引起的<sup>[3-16]</sup>.

1950年, Bowden and Tabor<sup>[2]</sup>提出另一个属于粗糙度理论的摩擦机理, 它现在已被广泛承认. 它设想摩擦力由两部分力所组成: 1) 剪切开两个对磨物体之间接触点处形成的微小焊合点所需的力; 2) 犁削软表面上的坚硬微凸体所需的力. 以变形理论或表面能理论为基础的其他理论也提出来了<sup>[3,17-21]</sup>. Rabinowicz<sup>[3,17]</sup>更加强调表面能是摩擦的主要供能者, Rigney and Hirth<sup>[18]</sup>, Tsuya<sup>[20]</sup>和 Liu<sup>[21]</sup>认为在滑动物体的近表面区域里所作的塑性功, 是摩擦力的主要来源.

Rubenstein<sup>[22]</sup>在试图建立摩擦的一般理论的过程中提出了一种以粘附理论为基础的理论, 在此理论中, 摩擦表面上接触着的微凸体, 按应力 $\propto$ (应变)<sup>n</sup>的规律变形. 他用他的数学模型表明, 摩擦力取决于施加的垂直载荷, 滑动着的材料的物理性质, 表面粗糙度和接触面积. Suh and Sin<sup>[14]</sup>在他们的理论中提出, 摩擦力基本上取决于滑动距离和环境条件, 摩擦力起因于接触面积之内的区域上微凸体的变形和粘附.

[2,23]指出, 实际接触面积 $A$ 取决于施加的垂直载荷 $W$ , 并由式 $A = K_1 W^n$ 给定, 这里 $K_1$ 和 $(2/3) < n < 1$ 是根据滑动材料物理性质而定的常数. 于是摩擦力由 $F = K_2 W^n$ 给出, 摩擦系数变成 $\mu = F/W = K_2 W^{-d}$ , 这里 $d = 1 - n$ , 弹性变形时,  $d > 1/3$ , 塑性变形时,  $0 < d < 1/3$ .

对磨体的摩擦, 并不象 Coulomb 最初提出的那样与速度无关. [3,13,23-28]指出, 摩擦是速度的函数, 而不仅仅取决于载荷. 一般来讲, 在低速情况下, 摩擦随速度而增强; 在高速时摩擦随速度而减弱<sup>[26,28]</sup>. [3,6-8,13,14,29-32]还指出, 摩擦取决于表面粗糙度. Whitehead<sup>[31]</sup>和 Archard<sup>[32]</sup>都指出, 在轻载荷情况下, 表面粗糙度的影响最大. 对于坚硬材料, 例如钢<sup>[13]</sup>, 摩擦随粗糙度而增强; 对于软材料, 如橡皮<sup>[6]</sup>、纤维材料<sup>[7]</sup>和尼龙<sup>[8]</sup>, 摩擦随粗糙度而减弱.

Rabinowicz<sup>[3,17]</sup>, Bowden and Tabor<sup>[2]</sup>, Rigney and Hirth<sup>[18]</sup>, Moor<sup>[13]</sup>,

Kragelskii<sup>[23]</sup>, Suh and Sridharan<sup>[33]</sup>, Tsuya<sup>[20]</sup>和 Liu<sup>[21]</sup>都指出,摩擦系数取决于材料的性质,如硬度、表面能、应变、密度和剪切强度。文献还指出,摩擦也取决于弹性模量<sup>[34,35]</sup>、再结晶温度、屈服强度和拉伸强度<sup>[36,37]</sup>。Bowden and Tabor<sup>[2]</sup>以及 Moore<sup>[13]</sup>指出,摩擦与硬度成反比;Tsuya<sup>[20]</sup>根据变形能的考虑指出,摩擦力与密度成正比。Kragelskii<sup>[23]</sup>, Buckley<sup>[25]</sup>和 Klamecki<sup>[38]</sup>指出,根据热力学分析,摩擦力取决于密度和温度。

有些文献还报道了摩擦明显地依赖于温度<sup>[2,13,25,30-42]</sup>和环境<sup>[2,13,23,25,40,41]</sup>。在真空中,摩擦可增大12倍<sup>[2,23]</sup>,这大概是因为接触面积增大,因而摩擦的粘附部分增大了。润滑剂对于摩擦有显著影响,这取决于它的剪切性质和热性质<sup>[2,25,43,44]</sup>。已经证明<sup>[45]</sup>,一种给定材料的摩擦,还取决于试验系统。把同一种材料的一些试件,分别在不同的试验室,以给定的条件测量摩擦。用的测试系统不同,每个试验室报道的摩擦值也不同。

滑动距离对摩擦的影响,取决于摩擦表面的初始变形的性质。它受表面光洁度、载荷、速度、材料性质和环境所控制<sup>[11,40,46-48]</sup>。滑动过程中,摩擦可能经历三个阶段:1) 初始阶段,取决于表面光洁度和氧化膜的性质和破损;2) 第二阶段,包括近表面层的塑性变形和加工硬化;3) 第三阶段,可能包括恒定的微结构或滑动过程的平衡,这是由温度的平衡状态和氧化膜形成和破碎的平衡造成的。Rigney and Hirth<sup>[18]</sup>认为摩擦的稳定状态阶段,是由于微结构达到一种稳定状态。Blau<sup>[46]</sup>提出,这大概是由于近表面微结构的结晶重新取向,产生了优选的晶体结构而造成的。

Sub and Sin<sup>[11]</sup>和 Blau<sup>[46]</sup>对摩擦的磨合过程作了详细研究。Blau报道了许多种材料的摩擦随滑动距离的变化,并指出载荷、速度和环境的影响。对于硬质金属摩擦副,例如钢,初始摩擦往往是弱的<sup>[11,46]</sup>,取决于施加的垂直载荷、滑动速度和环境。在大载荷或大速度情况下,初始摩擦大<sup>[40,47,48]</sup>。

## 2. 理论上的研究

对于两个同类摩擦体,摩擦力 $F$ 是其实接触面积 $A$ ,摩擦速度 $V$ ,施加的垂直载荷 $W$ ,密度 $\rho$ ,表面粗糙度 $h$ ,表面能 $S$ ,变形能 $E$ ,变形的面积 $Q$ ,温度 $T$ ,硬度 $H$ ,环境 $D$ 和实验系统 $Y$ 的函数 $\phi$ ,即

$$F = \phi(W, V, A, \rho, H, h, S, E, Q, T, D, Y)$$

通过量纲分析,上式可表示成

$$F = \phi(W, \rho V^2 A / W, (S/H)(1/V^2), (E/W)(Q/Ah) K_3) \quad (1)$$

式中 $K_3$ 是取决于温度、环境和实验系统的常数。因与粘附、表面能和变形能相关,故可假定摩擦系数由下式给定:

$$\mu = F/W = K_3 \phi_1(\rho AV^2/W) \phi_2(S/HV^2) \phi_3(EQ/WAh) \quad (2)$$

式中 $\phi_1(\rho AV^2/W)$ ,  $\phi_2(S/HV^2)$ 和 $\phi_3(EQ/WAh)$ 代表粘附、表面能和变形能因素。由式(2)看出, $A \propto W$ (见[2]),  $S \propto H$ (见[3]和[17]),以及 $E \propto W$ 。如果面积为 $A$ 高度为 $h$ 的微凸体被载荷 $W$ 所变形,那就可以证明,每单位面积的变形能是 $E_a = K_0 Wh$ ,这里 $K_0$ 是个常数。

Tsuya<sup>[20]</sup>从变形能的考虑,给出摩擦力 $F = 2E\rho Q$ 。乘以方程(1)中的各组,可以证明 $F = K_4 E\rho Q$ ,这里 $K_4$ 是取决于硬度、接触面积、载荷、表面粗糙度、温度,环境和实验

系统的一个常数。如果假定  $\phi_1(\rho AV^2/W)$  和  $\phi_2(EQ/WAh)$  的影响可以忽略,就可证明摩擦主要取决于表面能,即  $\mu = K_5 \phi_2(S/HV^2)$ , 式中  $K_5$  是常数。Rabinowicz<sup>[3]</sup> 通过研究与一个平滑表面接触的单个锥形凸包, 指出

$$\mu = K_6 / (1 - 2bS/H) \quad (3)$$

式中  $b$  (取决于表面粗糙度和焊合的几何形状) 和  $K_6$  (取决于剪切强度和屈服压力) 是常数。

Rubenstein<sup>[22]</sup> 的分析是基于粘附理论, 他根据他的数学模型指出, 两个摩擦体的摩擦系数由下式给定:

$$\mu = K_7 (A/W)^d \quad (4)$$

式中  $K_7$  是取决于表面粗糙度和材料物理性质的常数,  $d$  是前面给定过的。不过他没有考虑密度、速度、硬度、表面能和变形能。

如果把摩擦系统运行所处的温度和环境加以控制, 并使摩擦过程达到平衡, 则可以假设  $\phi_2(S/HV^2)$  和  $\phi_3(EQ/WAh)$  是常数。根据方程 (2), 摩擦系数就可由下式给定:

$$\mu = K_8 \phi_1(\rho V^2 A/W)$$

这里  $K_8$  是常数。如果假定  $\mu$  与速度和材料性质无关, 则满足方程 (4) 的一个适当的解可以假定是

$$\mu = F/W = K(\rho V^2 A/W)^n \quad (5)$$

如果一个被加载的半球形滑块停在一个相同材料的平滑表面上, 则真正接触的面积  $A$  由  $A = K_1 W^n$  给出, 这里  $K_1$  和  $n$  是常数; 对于塑性变形,  $n = 1$ , 对于弹性变形,  $n < 1$ <sup>[23]</sup>。于是摩擦力由下式给定:

$$F = A\tau = K_1 W^n \tau \quad (6)$$

式中  $\tau$  是把直接接触点处的焊接点剪切开所需的平均切向应力。根据方程 (5), 可证明

$$F = KW^{1-n} (\rho V^2 A)^n = KW^n (\rho V^2 A)^n \quad (7)$$

对比方程 (6) 和方程 (7), 可以看出

$$\tau = C_1 (\rho V^2 A)^n \quad (8)$$

式中  $C_1 = K/K_1$ 。

可以用 Stokes 定律<sup>[49]</sup> 解释剪切力对密度、接触面积和速度的依赖关系。如果假定滑体之一是足够塑性的, 以致它是一种粘性很大的“流体”; 另一个滑动体(滑块)相对地是硬的, 因而它以给定的速度穿过流体运动, 根据 Stokes 定律就可以证明, 阻力(摩擦)  $F_s$  是流体密度、滑块尺度和速度的函数, 即

$$F_s = C_2 \rho AV^3.$$

这里  $C_2$  是常数。所以对两种不同材料, 方程(5)中的密度是指其中较软的那种材料的密度。

### 3. 实验方法

用滑动速度达 4000 转/分钟 (2 米/秒) 的销-盘式试验机来作摩擦研究。在 Harwell 的原子能科学研究院 (Atomic Energy Research Establishment), 用同样的机器完成了一些对比性的摩擦测量。把直径 1 英寸的工业纯铝棒和铜棒, 机加工成 1/8 英寸厚的盘。把这些盘研磨、抛光, 并在甲苯和丙酮中清洗。把银亮钢销、杜拉铝销和铜销 (3 毫米直径) 用 200/400 石英砂 Diagrill 磨轮打磨过, 固定在试件夹里。试件放平误差在 5 微米以内。

用力传感器测量摩擦力。用 5 毫安电流通过销 (滑块) 和盘 (试件) 并测量造成的电

压, 来考察接触电阻 (示出金属接触面积的变化)。盘子不断用白节油清洗, 主要目的在于清除磨损微粒和保持低表面温度。白节油按 4 升/分钟 速度流过滑动轨迹后用 纸过滤, 循环使用。

#### 4. 结果和讨论

图 1 表示杜拉铝在铝上以 250 转/分钟 (154 毫米/秒) 速度滑动时, 由方程 (5) ( $d=0.12, k=2.4$ ) 计算出的以及实验测得的摩擦系数与载荷的关系。可以看出, 实验点落在紧靠理论曲线的地方。根据方程 (5), 在各种载荷下摩擦系数随接触面积和滑动速度变化, 分别示于图 2 和图 3。在非常大的载荷下, 摩擦几乎与速度及接触面积无关; 因此, Leonardo da Vinci and Coulomb 的观察结果被验证了<sup>[1,2]</sup>。然而在较轻载荷下, 摩擦明显地依赖于速度和接触面积。Kragelskii<sup>[2,9]</sup> 报道了在不同的接触压力下, 摩擦系数随速度变化的类似的观察结果。

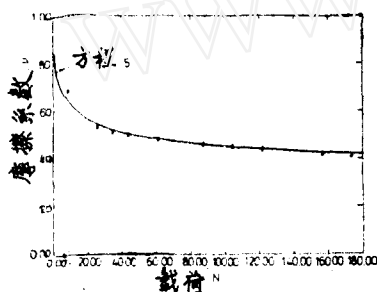


图 1 杜拉铝以 154 毫米/秒速度在铝上滑动时, 摩擦系数随载荷而变化。理论—实验

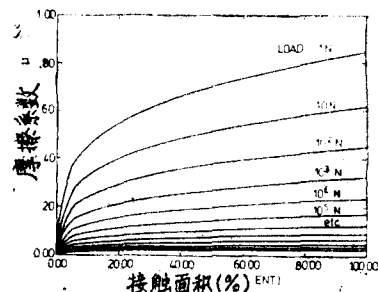


图 2 根据方程 (5), 杜拉铝在铝上滑动时, 摩擦系数与接触面积的关系曲线

197

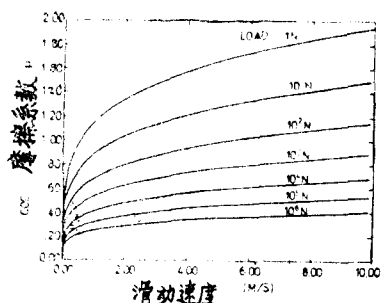


图 3 杜拉铝在铝上滑动时, 摩擦系数随滑动速度变化的理论曲线

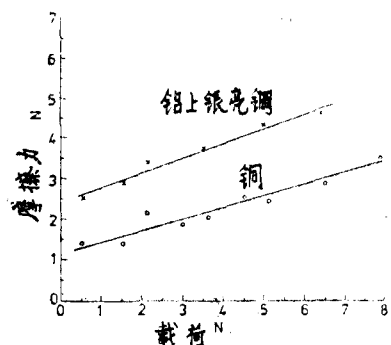


图 4 铜和银亮铜在铝上滑动时 (速度 154 毫米/秒, 润滑油是白节油), 摩擦力与施加载荷的关系曲线

对于铜在铜上, 和钢在铝上滑动的情况 (图 4), 在所研究的载荷范围内, 摩擦力正比于施加的垂直载荷; 因此是遵守 Amontons 定律的。如果曲线投影到垂直轴上, 则表示一个有限摩擦力, 这表明在零载时的有限的粘附力。不过从图 5 可以看到, 摩擦在接近零载时非常敏感, 并且不遵守 Amontons 定律, 图 5 是根据方程 (7) ( $K$  和  $d$  如前) 绘出的摩擦力随载荷变化的理论曲线图。

对于杜拉铝在铝上滑动的情况, 图 6 画出摩擦系数与载荷的关系曲线。在滑动时增大垂

直载荷所测得的摩擦(曲线 A), 与对每一载荷用不同的试件所测得的摩擦(曲线 B)之间, 有少许差异。这突出了表面光洁度和初始变形对摩擦极限值的影响。如果起初用较轻的载荷, 即磨合, 那会把表面磨平, 并引起表面加工硬化。但是, 如果滑动是由于一个大载荷而开始, 则一开始就会发生表面的严重变形, 并可能在整个滑动期间持续下去。在前一种情况下, 尤其是有润滑的情况下, 表面的微凸体会由于位错的产生和扩展受到限制, 而弹性地变坚硬些。从而这些微凸体会自相影响, 而大大加大摩擦力。在后一种情况, 变形可能基本上是塑性的, 并且表面容易氧化。结果使摩擦力变小(图 6 的曲线 B)。

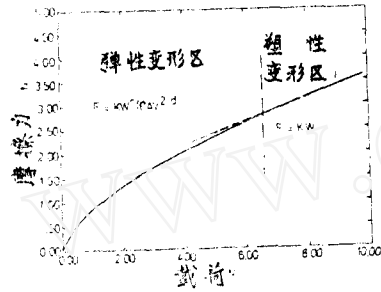


图5 根据方程(5), 杜拉铝在铝上滑动时, 摩擦力随施加的垂直载荷而变化的理论曲线

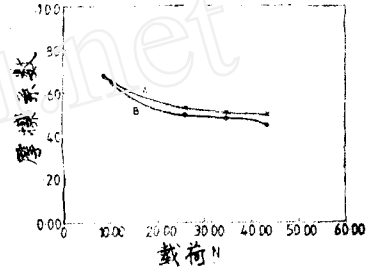


图6 杜拉铝在铝上滑动时, 摩擦系数与载荷的关系曲线:  
A 对所有载荷都用同样试件不间断地滑动;  
B 每种载荷用不同的试件

图 7 表示钢在铝上滑动时, 摩擦系数及接触电阻与载荷的关系曲线; 图 8 是钢在铜上滑动时的有关曲线。在所研究的载荷范围内, 钢在铝上滑动时有金属的接触, 但是对于铜在铜上滑动的情况, 在轻载荷时, 金属接触显著减少。在轻载荷时, 铜上的氧化膜很可能不破碎, 润滑剂的作用变得重要了。变形可能基本上是弹性的, 并且不遵守 Amontons 定律, 因而摩擦力主要由微凸体的相互作用所引起。在压力下, 铝中的变形容易在氧化层下面出

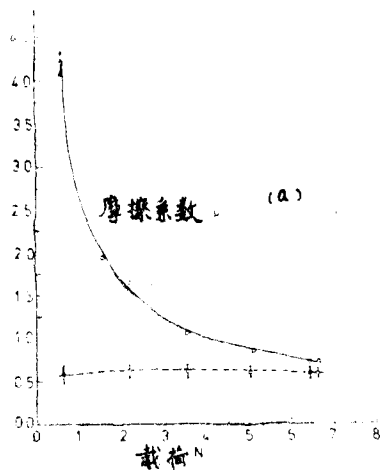


图7 银亮钢在铝上滑动时(速度154转/秒, 润滑剂是白节油), 摩擦系数和接触电阻随载荷的变化。虚线为接触电阻

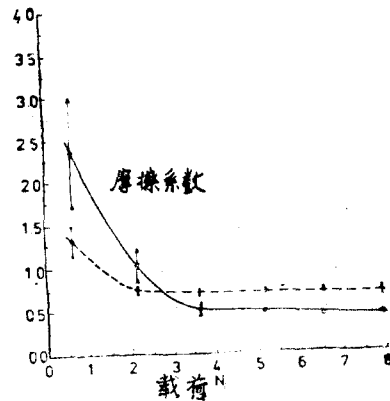


图8 铜在铜上滑动时(速度154转/秒, 润滑剂是白节油), 摩擦系数和接触电阻随载荷的变化。虚线为接触电阻

现<sup>[31]</sup>，因此即使是很轻的载荷，也足以引起表面脆性氧化层破断，而发生金属间的接触（图7）。

图9—12表示迅速改变滑动速度，对摩擦和接触电阻的影响。当滑动速度在滑动中突然增加到一个很大值时，接触电阻增大，摩擦如所预期地降低。当速度突然降低到很低的值时，出现相反情况。不过这种性状极大地取决于施加的载荷、滑动速度和材料。对于钢在铝上滑动的情况，载荷是2.12牛顿时（图10），滑块速度由218转/分钟突然增加到445转/分钟，摩擦增大。载荷是0.616牛顿时（图9），或铜在铜上滑动而载荷是3.64牛顿时（图12），情况就不是这样了。不过在铜摩擦副的系统中，在0.616牛顿载荷下出现同样的状况（图11）。

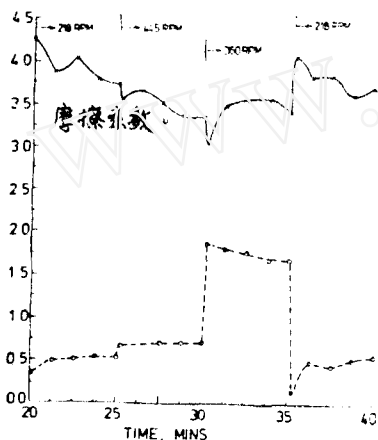


图9 银亮铜在铜上滑动时（载荷0.616牛顿，润滑剂是白节油），迅速改变滑动速度，对摩擦系数和接触电阻的影响。虚线为接触电阻

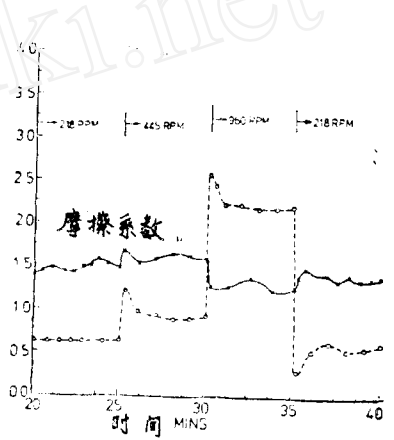


图10 银亮铜在铝上滑动时（载荷2.12牛顿，润滑剂是白节油），迅速改变滑动速度，对摩擦系数和接触电阻的影响。虚线为接触电阻

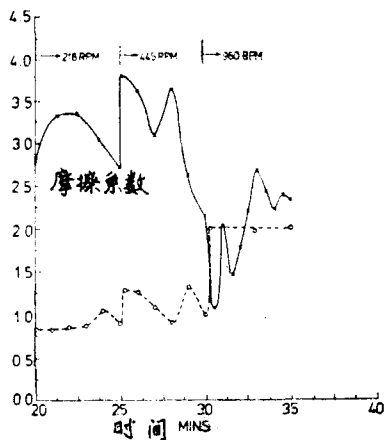


图11 铜在铜上滑动时（载荷0.616牛顿，润滑剂是白节油），迅速改变滑动速度，对摩擦系数和接触电阻的影响。虚线为接触电阻

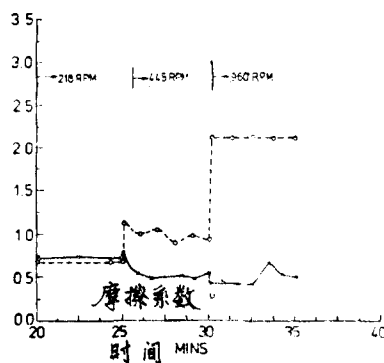


图12 铜在铜上滑动时（载荷3.64牛顿，润滑剂是白节油），迅速改变滑动速度，对摩擦系数和接触电阻的影响。虚线为接触电阻

在滑动期间，迅速增大载荷，造成摩擦系数陡降（图13）。在大载荷下，摩擦在载荷突然改变之后保持不变，但在轻载荷下，摩擦值是波动的。图14和图15也表明，不同的垂直载荷

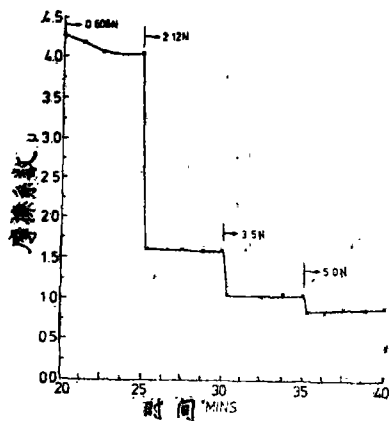


图13 银亮钢在铝上滑动时(速度154毫米/秒, 润滑剂是白节油), 施加载荷突然改变, 对摩擦系数的影响

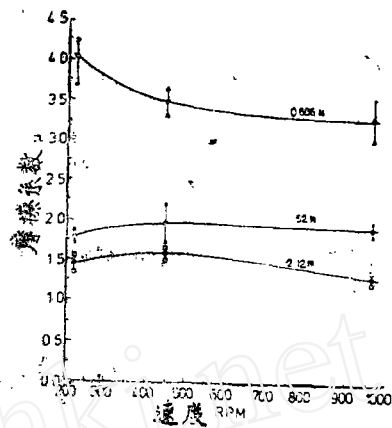


图14 银亮钢在铝上滑动时(润滑剂是白节油), 施加载荷对摩擦系数随速度而变化的影响

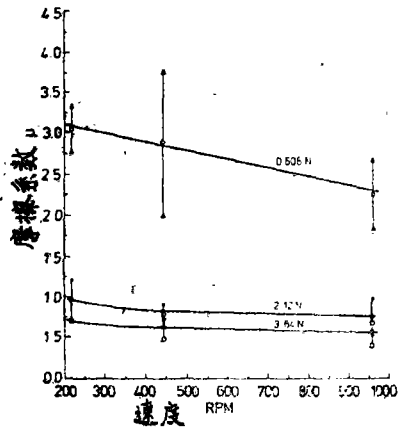


图15 铜在铜上滑动时(润滑剂是白节油), 施加载荷对摩擦系数随速度而变化的影响

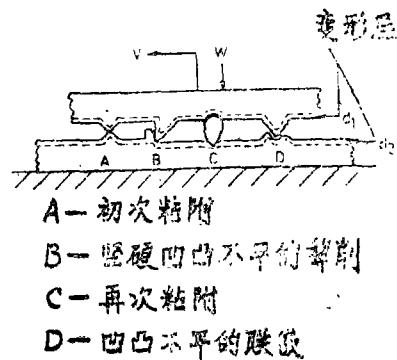


图16 在滑动交界面处, 典型的微凸体与磨损微粒之间的相互作用



图17 在铝上以154毫米/秒速度(载荷8.76牛顿)滑动的杜拉铝销被磨损的表面



图18 铝被磨损的轨迹(滑块是银亮钢, 载荷0.74牛顿, 滑动速度154毫米/秒)

下滑动速度对摩擦系数的影响,在轻载荷下,只有非常少的金属接触,这时可认为表面氧化作用和润滑剂的影响更加值得注意。

在轻载荷下,氧化层很可能保持完整,而速度增大时,更多的润滑剂被压进滑动着的交界面内,从而会出现滑块抬起,由于速度增大而引起金属接触面减小(图9—12)。较大载荷下接触电阻的增大,很可能主要是由于表面氧化作用的加强。对某些材料来说,表面温度正比于滑动速度(例如,见[42])。这意味着当滑动速度增大时,摩擦发热也增强,同时,滑动着的金属摩擦副的表面氧化作用相应地增强。因而高速滑动情况下,摩擦的减小想必是由于表面氧化作用或近表面层发热软化,而使正常剪切强度降低所致。

摩擦面之间的接触,通常假定是发生在表面微凸体之间,因此,对摩擦的分析,总是集中在这些微凸体相互之间以及它们与表面之间是怎么相互作用的问题上。在接触面内一些区域上的焊合,当然可能不必然是“两个表面本身焊合,而是一个表面与移动的金属的一个楔体(它使两物体表面分离)的焊合,以及楔体的个别毛刺之间的焊合”<sup>[50]</sup>。滑动过程中,交界面处的微凸体与磨损微粒的相互作用,可能象图16所示。可以看出,摩擦力是由下面几种力所引起的:1)剪切开A和C处的初次焊合点及二次焊合点所需的力;2)犁削B处表面所需的力;3)剪切开或抬起D处表面的微凸体所需的力。总摩擦力的大小取决于底下的 $d_1$ 和 $d_2$ 两层的变形程度。因此,以初次粘附模型为基础的摩擦分析,往往得出小于实验测得的摩擦力值,是不足为奇的。二次焊合的影响是增大了实际接触面积。实际接触面积的增大,通常认为是由于接合点增长<sup>[2]</sup>或表面能<sup>[3]</sup>引起的。在滑动交界面处磨损微粒的存在,往往使摩擦加大<sup>[46]</sup>,这多半是由于再次粘附所致;或者使摩擦减小,这多半是由于磨损微粒起着微小滚珠的作用,因而起着类似于润滑剂或轴承的作用所致。

在铝上滑动的杜拉铝滑块的表面磨损,示于图17。可以看出,它包括平行于运动方向的隆起线或微凸体。当在磨损轨迹上出现这些类似的隆起线,并且其中一些看上去是楔形的凸脊时,在滑动过程中就可能发生啃合,这可能是所观察到的蠕滑情况的起因。

### 5. 对现有理论的评论

在摩擦的变形能分析中,不考虑残余应力和随深度随滑动距离而出现的材料性质的变化<sup>[33]</sup>。变形理论假设摩擦力与载荷、速度、硬度、表面能、接触面积、粗糙度、温度和环境无关。如第2节所指出的,变形能正比于载荷;因此除了对一个给定的载荷和滑动条件外,它不象Tsuya<sup>[20]</sup>所提出的那样是个常数。一些变形模型是以磨损的剥层理论为基础的<sup>[33,51]</sup>。通常,在摩擦和磨损之间没有直接的关联<sup>[26,52,53]</sup>,某些材料不是靠剥层来磨损。

虽然摩擦力取决于表面能,但不能认为是唯一地取决于表面能。方程(2)表示表面能是控制摩擦的三个主要因素之一。Rabinowicz<sup>[3,17]</sup>的分析(见方程(3))仅仅在其他因素被绝对控制了的情况下才会有效。尽管这样,确定固体的表面能还是困难的。Rabinowicz<sup>[3]</sup>假定这与熔点温度下的情况一样,虽然他知道固体的表面能并不是与温度相关的<sup>[17]</sup>。另外,一个完全纯净的固体的表面能,可能并不代表滑动时的表面能。Rabinowicz<sup>[17]</sup>尝试用如下的假设来解决这个问题:形成一个磨损微粒所需要的能量,等于保持微粒在其基底上的粘附能量。接着他指出,由测量磨损微粒的平均直径 $d$ ,可以计算出表面能。他认为磨损微粒直径取决于摩擦接触中的材料性质和环境(例如润滑剂)。他主张 $d$ 与载荷及滑动速度无关<sup>[17]</sup>,因此认为摩擦是与这些参量无关的,不过这就与本文讨论的大多数文献中的结果相



矛盾，特别是与他的其他工作相矛盾<sup>[10,11]</sup>，他在那些工作中指出过，摩擦是载荷和速度的函数。

摩擦接触中表面非常清洁时，摩擦力可能主要是剪切开直接接触点处的焊合点所需的力引起的。然而实际上，滑动表面难得非常清洁。对金属摩擦副来说，滑动交界面可能由金属-金属、金属-氧化层或氧化层-氧化层的接触区域所组成（图18），摩擦力的粘附部分则仅仅由决定于表面温度的金属接触所引起。

在轻载荷和小速度的情况下，润滑了的滑动表面不大可能达到足够的温度来引起接触点焊合。不过在这些条件下，大多数材料的摩擦通常比在大载荷和/或高速度时的摩擦要大些。因此，摩擦的机理必然是支持微凸体的相互作用（例如犁削或啮合）。

粘附理论假设，剪切开焊合点所需要的平均剪应力是个常数，并且与滑动条件无关。按照方程（8）就不是这样，而是剪应力是速度和材料性质的函数，不单单取决于载荷和接触面积。Burwell and Rabinowicz<sup>[12]</sup>曾提出，滑动速度以两种方式影响摩擦力：1）通过在焊合点附近产生的剪应变率；2）通过一个焊合点达到最大强度所需时间的长度。通常假定屈服应力是整块材料的屈服应力。在焊合点强度大于基底材料强度的地方，这无疑是不符合实际的。

## 6. 结论

争论的焦点是：摩擦来源于：1）平行或垂直于运动方向的那些微凸体的啮合；2）微凸体、磨损微粒和平滑摩擦表面之间的粘附；3）犁削硬表面的微凸体（见图16）。认为可能在犁削着的微凸体的顶上也发生粘附。所有这些过程，取决于表面能，取决于表面微凸体和近表面层的变形特点和程度，它们都受试验特点、载荷、温度、速度、滑动距离、表面粗糙度、材料性质和环境等所控制。所以在滑动接触期间，这些过程是相互依存的，以致不论是粘附、变形能理论，还是表面能理论，都不能单独地解释摩擦的机理。

在滑动交界面处产生的能量，大部分用于微凸体的变形和近表面层的变形，以及随后产生磨损微粒。能量随着滑动距离而逐渐积累，存在一个标志着达到平衡状态的极限值，它大概与能量的反复耗散有关。因此，一个磨损颗粒中所贮存的能量，是滑动距离的函数，但摩擦极限值却不是。

在滑动期间，当能量达到临界值时，严重变形的表面层顶部，多半以剥层的形式被磨掉。能量继续积累起来，直到有足够的能量磨掉第二层。这种过程有利于磨损微粒的产生，它可能是局部性的，会引起不规则的表面。反复的能量耗散过程的实质，正象 Rabinowicz<sup>[17]</sup>报告的，可能是磨损微粒的尺度的周期性变化。同时还提出，在一个给定的滑动周期中，磨损微粒将有各种尺度的，比方说对于一个正弦式的能量耗散过程是一个高斯分布。

对方程（2）的精确性质还不知道，不过它强调摩擦取决于粘附、表面能、变形能和滑动温度以及环境，假定的解（方程（5）），仅仅在滑动过程达到平衡时才是正确的。在滑动平衡状态下， $K$  和  $d$  是常数。显然， $K$  取决于表面能、硬度、接触面积、速度、载荷、粗糙度、变形能、被变形的面积、温度、环境和实验系统。因此需要进行更多的工作，以弄清它对这些参量的依赖关系。

参考文献（53篇，略）

孟 珊译自：*Wear*, 87, 2 (1983): 191—206. (俞稼梁校)