

摩擦学基础(1)

笠原又一

〔オイレス工業(株)〕

一、摩擦

1. 克服摩擦

古代众多遗迹中, 由巨石堆砌的城堡、纪念碑及古墓等为数甚多。在当时还没有理想的工程机械的情况下, 完美地完成那样大型的工程, 使生活在今天的人们都为之震

惊。

在一个遗留下来的壁画中详细地描绘了当时搬运巨石的情景。如图1〔1〕所示, 很多人聚集在一起, 拉的拉、撬的撬, 一派热闹景象。画面情节非常细致, 连站在石像行进前方手持大油罐注油的润滑工也画出来了。现在看来, 这位注油的人或许就是最早的润滑学者——从事润滑研究的先驱。

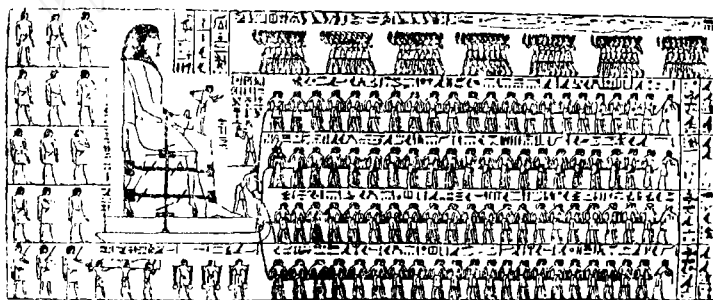


图1 古埃及搬运巨大石像的情景(公元前1880年)

图1 记叙的是发生在古埃及的事, 距今已近4000年了, 它反映出人类同摩擦进行斗争由来已久。在大量的实践过程中, 人类积累了许多经验。例如, 水平拖运物体时, 据记载, 中国北方有利用冬季的气候, 在地面上洒水结冰, 然后在冰上拖运大石块来修建石碑和宫殿的。日本最近出土的一种叫“修罗”的V型滑道, 也是古代的一种搬运工具。利用这种工具可以较方便地拖拉重物。可见, 为了同摩擦作斗争, 人们不仅利用各种自然环境, 还发挥了聪明才智制作了各种

工具。

古代的土木建筑师们在克服摩擦方面也想了很多办法, 并作出了成绩。值得注意的是, 当时人们已经使用了现在常用的减小摩擦的多种方法。即利用撬杠等工具的滑动法、使用滚杠的滚动法以及加注润滑油或脂的润滑法。后来, 人们发明了车轮, 而且在车轴上使用了青铜护圈, 其上还涂了由动物脂肪或植物油同石灰混合的润滑脂。就象我们在汽车底盘那样振动较大的部位使用附着性好的润滑脂而不用润滑油的做法一样。

然而,对摩擦学进行科学的分析还是几千年后才出现的。没成名的建筑学家、发明家及科学家雷纳德·达芬奇(1452~1519年)对人们已沿用多年的经验进行了科学的总结。在他的笔记中曾写下“摩擦系数大约为物体重量的1/4”。有关磨损则提到“软-硬物体相互摩擦时,若有第三种较硬物质混入其间,就会被嵌入软物体中来磨削较硬的偶件”。曾田〔2〕说他的后一见解大概是在研磨石料过程中悟出的道理。

2. 什么是摩擦(凸凹学说与粘着学说)?

继达芬奇之后,阿芒汤(Guillaume Amontons; 1665~1705年)认为,实际上,摩擦系数要比达芬奇指出的值大些,约为物体自重的1/3。以后,又过了100多年,才出现了以阿芒汤-库仑(Charles Augustin de Coulomb, 1736~1806年)命名的法则。它包括下述三条:

(1) 摩擦力与作用于摩擦面上的法向负荷成正比,与表观接触面积无关(见图2);

(2) 摩擦力(动摩擦)与滑动速度的大小无关(见图3);

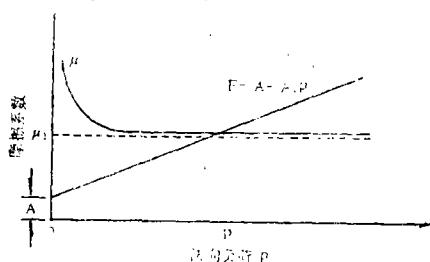


图2 库仑摩擦方程中的几个关系

F—摩擦力; μ —摩擦系数; P—法向负荷

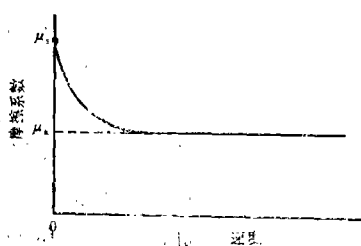


图3 摩擦系数与滑动速度的关系

(3) 静摩擦大于动摩擦。

这三条都是有关固体之间摩擦的法则。

库仑认为,当两物体相互接触时,由于滑动面上凸凹不平,摩擦力表现为凸峰之间相互啮合时爬越及破坏所产生的能量损失,这曾是一个很有说服力的学说,但它却难以解释以下两个事实,即当存在极薄的润滑膜(10^{-6} mm)时,摩擦也会急剧下降;另外,爬上和滑下凸峰时消耗的能量之和也没有大到物体自重的1/3。因此,出现了粘着学说。

关于摩擦的粘着学说,后面还将详细叙述。它是由英国的德萨古利尔(J. T. De Saguliers, 1683~1744年)从切开的两个铅块合在一起摩擦后又牢固结合为一体的实验现象出发提出来的。后来,鲍登(Frank P. Bowden 1903~1968年)通过进一步的研究完善了这一学说。他指出,当两个相互接触的物体间达到分子间引力相互作用的范围时,就会发生粘着。这时,克服粘着所需的力就是摩擦力。这就是说,有时接触表面越平滑,摩擦系数会越大,这可由图4〔8〕看出。

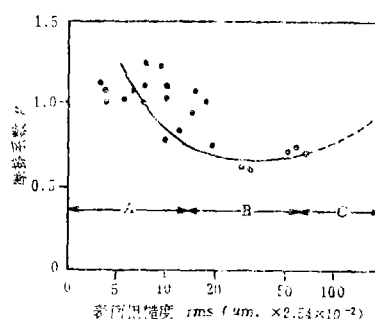


图4 表面粗糙度与摩擦系数的关系

铜-铜,无润滑,负荷为9.8N,速度为0.1mm/s;
A区中的曲线变化由真实接触面积变化引起;
C区中的曲线变化由凸峰间的啮合引起;
B区为稳定区

3. 影响摩擦的因素

要问摩擦面是怎样构成的,粘着究竟对摩擦力起着多大的作用,必须先了解真实接

触面积。

(1) 真实接触面积

不论什么材质的两物体在一定负荷下接触时,接触实际上是发生在无数小凸峰构成的面积上,比表观接触面积要小得多。这就是真实接触面积的概念。这一概念成立的前提、理论和实验(用高分辨显微镜观察)都已证明,在一定的范围内,加工精度控制得好坏对材料的真实接触面积的影响不大。

那末,真实接触面积(A_r)有多大呢?若以 W 表示负荷, P_m 表示材料硬度(平均屈服压力),则可得到如下表示式:

$$A_r = W/P_m \quad (1)$$

下面让我们来试求一下两块硬度为HB200(1960N/mm^2)、边长为5cm的正方形钢材,在980N负荷下使之相互接触时的真实接触面积:

$$A_r = 980/1960 = 0.5\text{mm}^2$$

而这时的表观接触面积为:

$$50 \times 50 = 2500\text{mm}^2$$

即真实接触面积仅为表观接触面积的1/5000。一般认为,接触实际上发生在直径 $a \approx 0.04\text{mm}$ 、面积约 0.0015mm^2 的无数个小凸峰上。这些凸峰的顶部互相穿破对偶表面的锈层和污染吸附层,形成了部分金属之间的接触。这种接触的特点是,材料越硬,接触面积越小,当增大负荷时,它表现为接触的凸峰数量增多(见图5和6),因而其真实接触面积也增大。

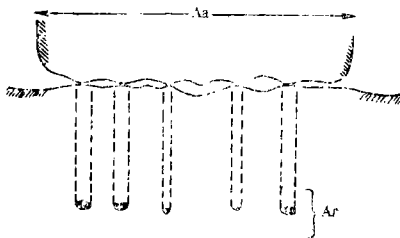


图5 真实接触图

A_a —表观接触面积;
 A_r —真实接触面积

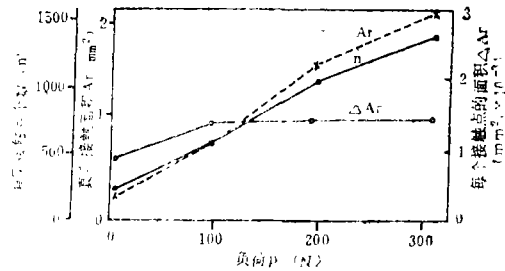


图6 真实接触面积、接触点个数及每个接触点的面积与负荷的关系

(2) 粘着点的剪断

关于真实接触部位是否真的发生了粘着,曾有很多不同的看法。业已证明,真实接触部位单靠施加压力,不易产生粘着,若使之相互滑动,便很容易产生粘着。钢等软金属材料由于没有弹性变形,经常被用来测定粘着力,图7便是一例。

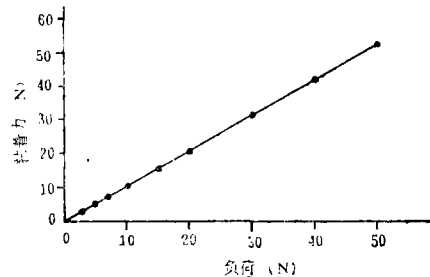


图7 $\phi 3.8\text{mm}$ 的钢球与钢洁净表面间的粘着力

现在来考虑一下粘着点。若使两个相互接触的物体相对平行移动,粘着点必然会发生破坏,其破坏形式通常是凸峰与凸峰顶粘着点发生剪断(图8中的a);但当粘着点很牢时,就会在较弱一方材料的本体中发生断裂(图8中的b)。若将材料的剪切强度记为 S ,则产生剪切所需的力 F (即摩擦力)为:

$$F = S \cdot A_r \quad (2)$$

若取钢材的抗张强度是压痕硬度的1/3,剪切强度是抗张强度的0.8的话,对于前面提到的例子来说,可得

$$F = 1960 \times 1/3 \times 0.8 \times 0.5 \approx 262\text{N}$$

$$\mu = 262/980 \approx 0.267$$

这样求得的摩擦系数接近于达芬奇给出的值。

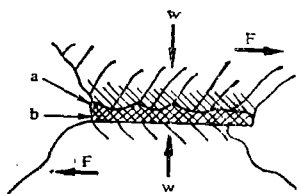


图8 粘着点的剪断

a—粘着区；b—断面

一般来说，摩擦力并非只取决于粘着而是下述四种因素共同作用的结果，只是依条件不同而已。一般，这四种因素所占的比例为：

- (a) 产生于粘着的 80~90%
- (b) 刨削 10%
- (c) 凸凹 3~7%
- (d) 剪切吸附层 2~3%

下面用真实接触面积和粘着学说的观点来证明阿芒汤-库仑的第1和第2法则。

首先，证明摩擦力(F)与表观接触面积(A)无关。由式(2)

$$F = S \cdot A_r$$

可知，摩擦力只与真实接触面积和材料的剪切强度有关，与表观接触面积无关。

将 $A_r = W/P_m$ 代入式(2)可得：

$$F = \frac{W}{P_m} \cdot S \quad (3)$$

由此式可知，摩擦力与负荷(W)成正比。

另外，由于摩擦系数(μ)可表示为：

$$\mu = \frac{F}{W} = \frac{A_r \cdot S}{A_r \cdot P_m} = \frac{S}{P_m} \quad (4)$$

可见，摩擦系数不仅不受负荷的影响，而且也与速度无关。

下面再来考察一下第3法则——静摩擦大于动摩擦。

4. 静摩擦与动摩擦

一般情况下，刚刚开始滑动时的摩擦系数要比滑动中的大。前者称为静摩擦(静摩擦系数用 μ_s 表示)；后者称为动摩擦(动摩擦系数用 μ_k 表示)。两者之差一般在10~20%左右(图9)。

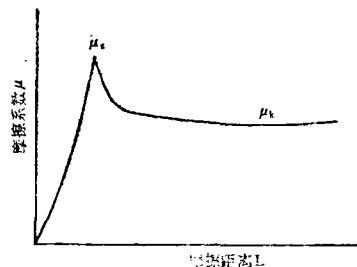


图9 摩擦系数

许多场合下，大的静摩擦系数是我们所希望的。例如，火车刚刚开动时，车轮与钢轨之间需要大的摩擦力(即牵引力)；汽车的手闸、连接木材所用的钉子及钢结构固定用的螺栓和铆钉等都需要大的静摩擦起固定作用。然而，另一些情况下，它又的确使人们大伤脑筋。

一般认为，导致静动摩擦系数不同的原因有以下几点：

(1) 刚刚要滑动时，真实接触面积逐渐增大；

(2) 静止时，由于蠕变作用使真实接触面积增大；

(3) 运动中，由于表面温度升高使表层的剪切强度下降，而次表层以下则保持不变，这时的表层可起到固体润滑剂的作用；

(4) 当有油存在时，即使量不多，静止时会从接触部挤出，但在运动时则可被带入，因而降低了动摩擦。

此外，在低速情况下，有时蠕变作用也会使接触面积增加，导致静摩擦增大。图10所示的摆动运动就是一例。

图11表示的是不稳定摩擦状态，一般称为粘-滑现象。这种现象多见于 μ_k 随摩擦速度增大而下降的材料(阿芒汤-库仑法则的

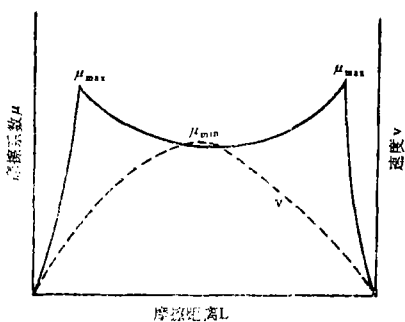


图10 摆动运动的摩擦系数

一个例外)。另外，滑动部位支承结构的刚性低，又因润滑作用使 μ_k 有所下降的系统，也易出现粘-滑现象。因此，这种现象经常发生在 μ_s 和 μ_k 的绝对值之差较大的情况。而对于聚四氟乙烯之类 μ_k 随滑动速度的增大只是略有增加的材料，则不易发生。粘-滑现象常常是噪音及振动产生的主要原因，所以它使人厌烦。而在弦乐器上擦涂松香来助长其作用则是粘-滑现象的积极利用。

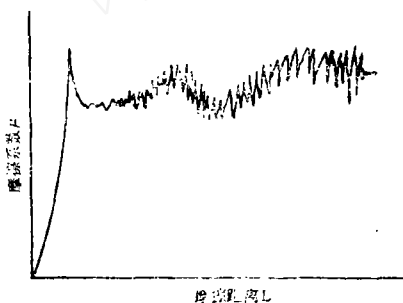


图11 不稳定的摩擦（粘-滑）

5. 摩擦功

最初凸凹不平的表面随着摩擦的进行而渐渐变得平滑，或是相反，表面刮伤得更厉害，并伴有磨损产生。因而很容易简单地得出摩擦功变为机械功的结论。然而，这是很不全面的。

（1）转化为热能

实际上，摩擦功大部分转变为热能，这一点在原始社会就被人类发现，所谓“钻木

取火”就是基于这一原理。日本神话中的日本武尊在遭野火围困时，就是他用打火石放火使自己周围的野草燃过才免于受难的。这种发火方法在人们发明火柴以前一直被使用。人们将玻璃粉加入红磷一起粘在盒上，当火柴与此摩擦时由于较高的摩擦系数，使之容易发火。用Auer合金（铁-铈合金）作打火机的打火石，它与铁制摩擦轮摩擦产生火花。这些都是由于高熔点材料在摩擦时其微粉状磨屑飞溅，利用摩擦功转变成热而使其发火的。

摩擦功（即机械功）——热能的转换效率，是由摩擦系数决定的。摩擦产生的热量 $Q(J/s)$ 可表示为：

$$Q = \frac{\mu \cdot W \cdot V}{J} \quad (5)$$

式中 W 为负荷（N）， V 为滑动速度（m/s）， J 为热功当量（N·m/J）。例如，在980N负荷作用下，滑动速度为1 m/s，摩擦系数为0.25时，每秒钟产生的热量为：

$$Q = \frac{0.25 \times 980 \times 1}{1} = 245(J/s)$$

（2）温度上升的顶点

已知摩擦时会产生温升，那末摩擦面上的温度能升到多高呢？

摩擦表面上微小的凸峰，因为体积甚小，瞬间会达到很高温度，这一点很容易想象。但从实验上证实它却不容易。表1是在材料中插上热电偶测定的滑动摩擦时的表面温度。可以看出，材料熔点越高，表面所达到的顶点温度也越高。这种现象可以认为是摩擦表面达到瞬时高温时，材料获得潜热

表1 滑动表面的温度

材 料	熔点(℃)	表面温度(℃)
镓	32	32
伍德合金	72	72
铅	327	327
钨	1290	-

（下转第209页）

则可以预计,多孔的以及强度可能很弱的上层氧化膜将破碎而暴露出底部的氧化层。这类磨损形式的研究应当包括底部薄氧化膜和多孔或有裂缝的氧化物磨屑的研究。

八、结 论

本文评述了轻微磨损和铁表面氧化的理论,描述了铁的氧化膜的性质。评估了所提出的磨损模型中有关氧化膜生长的假设的适用性。下述结论有普遍意义:

1. 将氧化膜理论引入磨损机制中很有意义,但是由于缺乏有关磨损氧化膜物理状态的知识而受到限制。应当设法测量氧化膜和基底金属的结晶粒子大小、晶体取向和应变等参量。

2. 在氧化磨损中采取抛物线或线性氧化规律时意味着对于氧化膜结构的和磨损的类型有特定的假设。应当检测磨损表面和磨屑以考察这些假设是否合适。

3. 氧化膜对铁的磨损表面保护是通过许多不同机制作用的。近代的研究多在确定各自独立的机制,但尚无统一的理论。而除非做到这一步就不可能达到对轻微磨损的本质有根本性的了解。

4. 由氧化膜生长和硫化膜生长的比较性研究可以对含硫添加剂的极压润滑机制提供线索。本文对此只是略有涉及。

参 考 文 献(略)

(张人佶译自 Wear, 113 (1986), 203~223, 崔周平 校)

(上接第193页)

而熔融所致。熔融的材料产生润滑作用,使摩擦系数降低。在这个过程中,由于热传导作用,摩擦热很快散失,摩擦表面则不能长久维持高温(只能维持约 10^{-4} 秒)。

根据这个道理可知,低熔点材料的合金作为轴承材料使用是非常有利的。而且,材料的导热性越好,轴承的性能越佳。

闪温现象在边界润滑状态(后叙)下油膜被挤破时也会产生,它是导致润滑油劣化的一个重要原因。

滑动部件的温度升高后,一般会引起下述几种情况,须加以注意:

(1) 润滑油、脂的劣化(分解或聚合);

(2) 金属轴承的咬粘、磨损;

(3) 高分子轴承材料的老化、熔融、变形和破损;

(4) 轴承尺寸的变化(间隙的变化)。

(待续)

(李同生根据作者在华讲学稿翻译整理,未经作者审阅)