

# 浅谈摩擦学

李 莉

40多年前,在英国剑桥大学的卡文迪许实验室, D. Tabor 负责的摩擦、润滑和磨损实验组曾被笑称为“摩擦和擦洗部”,如今情况今非昔比. Tabor 在 1950 年将物理学引入摩擦、润滑和磨损等方面,将研究相对运动的表面间的相互作用及其有关理论和实践的一门科学技术命名为摩擦学 (Tribology 来自希腊学

“tribos”意即摩擦). 由于摩擦规律蕴含大量微观和纳米量级现象,涉及物理、化学、材料学和工程学的基础,阐明这些现象已成为应用物理中引人入胜的研究工作,所以当今的摩擦学可以说是很时髦的边缘学科,本文将对这一领域以往的研究成果和现状做简要介绍.

## 一、摩擦定律

摩擦学的源头应属于技术科学,而且可以回溯到 5000 多年前的新石器时代,公元前 4000 年,在亚述人农村的门轴孔中已应用了轴承,还有一个古埃及坟墓的画面上,绘有奴隶们拖动厚木板上的塑像的情景. 他们在塑像前倾倒一种液体,尽管这种液体是油,是水,还是牛奶考古学家已无法确认,但它是首次记载的减少摩擦的润滑剂.



尽管人们早就意识到了摩擦的存在,可是一直都没能用科学的方法来研究它. 直到 15 世纪末,达·芬奇采用了让物体在斜面上滑动的摩擦实验方法,第一个阐述了摩擦定律,他还研究了磨损的本质、润滑的作用及轴承的设计等问题. 其中最重要的两个发现是:①摩擦力与表观接触面积无关,②

摩擦力与作用在滑动物体上的正压力成正比,其比值称为摩擦系数.

遗憾的是达·芬奇的大多数论文直到 1960 年才发表. 17 世纪末, G Amontons 独立地研究了润滑和非润滑两种摩擦,于 1699 年 11 月 19 日在巴黎皇家科学院发表了他的发现. ①摩擦产生的阻力的增大或减小,仅与压力的增大或减小成比例,而与接触面积的增减无关;②如果在表面涂抹猪油的话,对铁、铅、铜和木头来说,在任何一种组合下,摩擦阻力都大约相等;③摩擦阻力约等于压力的  $1/3$ .

其中的第一条就是现在的 Amontons 摩擦定律,即

- (1) 摩擦力与所加的压力成正比;
- (2) 摩擦力与表观接触面积无关.

上述两个实验定律适用于较大物体的滑动(有或无润滑两种条件).

- (3) 动摩擦与滑动速度无关.

这第3条定律是库仑在1785年得出的。他还假设了摩擦的两种构成方式：第一种是摩擦随负荷而变化(Amontons第一定律)，第二种是摩擦起因于附着作用。库仑的模式现在看来是十分贴切的，因为在纳米尺度，附着方式开始起主要作用。

## 二、摩擦机理与附着力

现今绝大多数的摩擦理论都假设剪切强度(单位面积阻碍滑动的力)是常数，由此得出摩擦力与实际接触面积成正比。这种观点与Amontons摩擦第二定律很一致。因为显微观察表明材料的表面是不规则的，它们接触点的总和决定真实的接触面积，因而也就决定了摩擦力的大小。就库仑所定义的摩擦系数而论，不同材料摩擦系数稍有差别，但对不同的界面，剪切应力却可以变化几个数量级(见表1)。例如，钢是钢的400多倍，这正是摩擦力与剪切强度(钢低钢高)和实际接触面积(钢大钢小)两者都有有关的结果。

表1 钢块与4种材料之间的摩擦系数和剪切应力值

材料	摩擦系数( $\mu$ )	剪切应力(g/mm)
钢 In	2	325
钢 Pb	12	1600
钢 Cu	0.8	28000
钢球	0.8	140000

Tabor的小组通过实验测量两个相接触的金属表面接合部的电导率(假定电导率正比于实际接触面积)，结果证实负荷与实际接触面积线性相关。理论上对这一问题的探讨属于接触力学的范畴。1960年剑桥大学的J. Greenwood研究指出，在产生完全范性形变的负荷条件下，对单一球面接触或对有相同高度的一系列类球体接触，接触面积正比于负荷，因而也正比于摩擦力。在弹性接触的条件下，

H. Hertz的理论预言负荷与接触面积(因而也与摩擦力)是非线性(2~3次幂)关系，因而摩擦系数不再与负荷无关。在考虑了表面微凸体的高度分布时，就可以很好地解决范性与弹性形变的问题。Greenwood指出，在表面微凸

体高度按指数分布时，不论是弹性还是范性接触，总接触面积对负荷的依赖关系是线性的。这与摩擦第二定律完全一致。此外，表面微凸体的高度是高斯分布的情况下(工艺设备表面通常如此)，接触面积与负荷的关系也非常接近线性。

对于某些系统，剪切应力随负荷的增大而加大，这表明有另外的作用机理对摩擦力有贡献。例如，金属与金属紧密接触，触点发生“冷焊”从而导致显著的附着力时，可以观察到偏离摩擦定律的现象。又如，对于聚合物系统，或更一般地说对粘弹性系统，经常可以观察到偏离摩擦第二定律的现象。橡胶就属于这类材料中的一种，汽车轮胎应具有低的滚动损耗和高的滑动摩擦。轮胎橡胶与坚硬路面间的接触，弹性形变常常起主要作用，摩擦系数随正压力、温度和滑动速度变化显著，所以这类材料的摩擦系数没有单一的值，形变和附着力是能量消耗的主要机制。摩擦力甚至可以在无负荷的情况下出现，它起因于粘附结合处的剪切作用，在金属与金属接触的情况下，这是一个磨损过程。然而，磨损和摩擦又常常彼此独立，有许多高磨损低摩擦系统(粉笔在黑板上、钢笔在纸上)，也有低磨损高摩擦系统(制动装置)。纳米摩擦学实验已表明高摩擦不一定伴随着磨损。

附着作用与摩擦的关系还有待探讨。美国加州 Santa Barbara 大学的 J. Israelachvili 和他的小组近来实验显示，对于某些系统，摩擦力是与附着力的不可逆分量即附着力的滞后作用相关而与附着力本身无关。他们还提出了一个热动力学模型来解释它。对于无附着作用的表面，使用约束相对表面间的分子所需的功来描述摩擦力，于是不可逆的可缩功是滑动期间能量损耗的主要原因。在这个模型中，接触面积的整体概念成为有争议的问题。

## 三、润滑作用

在工业应用方面，摩擦学的首要任务是减小摩擦系数，降低能耗并避免磨损。当两个物体表面接触且有相对运动时，产生磨损是一个很自然的结果。相对表面之间的润滑剂或它的

薄膜保证了剪切应力发生在液体内部,即液体—液体接合之间,该接合处决定了阻碍滑动的力。如果物体表面涂了一层润滑剂薄膜,那么在接触下形成液体结合直至达到薄膜的临界切向力,此时将发生显著的滑动,在相对运动的部件之间引入流体薄膜解决了大量的摩擦学问题。虽然在远古时代人类就使用了润滑剂(如古埃及坟墓中),但直到19世纪,铁路的发展、机器润滑应用的增加以及矿物油的发现,才使得润滑法成为摩擦学研究的前沿课题。

在早期的润滑研究中, B Tower做了许多重要的实验,他发现在径向轴承(圆柱套圆柱)的顶上钻一个洞,只要轴承转动,这个洞就成为油源的出处,并测量了沿轴承的不同方向的压力分布。他还注意到径向轴承上的切向摩擦力随滑动速度的增加先通过一个极小值而后增大。在此基础上,1886年, O. Reynolds发表了著名的液体薄膜润滑方程,该方程给出了润滑剂压力、运动表面的相对速度、薄膜厚度及润滑剂粘度之间的关系,能定量地算出 Tower的结果。对 Reynolds 方程最有决定作用的解释是液体薄膜形成了一个厚度沿运动方向减小的楔形体(见图1),这一楔形薄膜提高了承载负荷的能力。

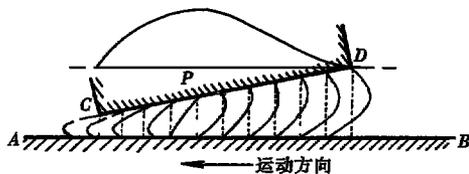


图1 相对运动表面间的楔形膜

20世纪初, R. Stnbeck继续了 Tower的工作,对滑动轴承进行深入细致的实验研究,得出了摩擦力作为滑动速度、润滑剂体积粘度和所加负荷的函数的特性曲线(图2)。在低速时,摩擦力几乎与负荷无关,随速度的增加,摩擦力急剧下降至极小值,然后缓慢增加,这个极小值很有意义,它将良好的无磨损区域(在较高速度区)与可能发生强烈磨损的区域分开,在强磨损区域中负荷不能完全被润滑层的流体压力所补

偿。

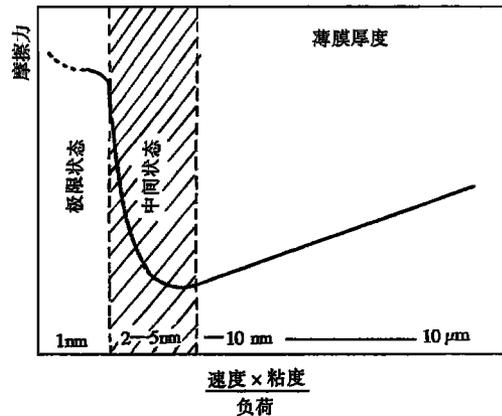


图2 Stnbeck曲线

在改进润滑油性能的尝试中,更常见的做法是使用低浓度的添加剂。添加剂(通常用脂肪酸)吸附在滑动表面上,防止在低速或高负荷情况下金属—金属毁灭性的接触。如果没有添加剂的改良,本世纪20年代就不可能将准双曲面齿轮用于机动车。本世纪后半期采用了一种更好的减少磨损极限压力的添加剂。在控制这些添加剂(包括氯的碳氢化合物,如含有金属、磷或硫的化合物)腐蚀的过程中,当它们形成低切应力的生成物时,仅在极限状态下与表面作用。

事实上,以往所有的耐摩擦和磨损的添加剂是按经验来改良的。但是近30年的表面科学研究出现之后,才从分子水平上来了解添加剂的作用。A. Gellman在超高真空条件下测试了亚单原子层润滑剂涂层对经硫化处理的Ni单晶之间摩擦的影响。有趣的是,摩擦系数随涂层面的增加单调地减小,直到达到单原子层,摩擦系数保持不变。

W. Tysoe研究了现今普遍认为失去效用的氯化烃类。他指出该烃类中的几种化合物本身在铁氯化物的熔点(940K)失效,但在极端条件下生成了保护表面的 $FeCl_2$ ,所以氯化烃类对钢的应用来说是很有效的(极端压力下)添加剂。

铁路的出现显然是润滑技术发展的驱动力。早期俄国的火车使用猪油来润滑径向轴

承,取代西方更常用的矿物油。在 Tower 的径向轴承研究和继之为减少油耗设计改变之前,一种很粘稠的猪油是有吸引力的选择。然而用猪油的一个不幸后果是被饥饿的农民偷窃,他们大概将猪油夹在面包中吃了。俄国管理机构对此的解决办法是在猪油中加碳黑,碳黑不仅使猪油不能吃,因而消除了偷盗,而且由于碳黑含有石墨成份,出乎意料地明显地改善了润滑作用。这是润滑剂的又一种情况,它是通过在接触区域内形成了一个低剪切强度层来工作,在这种情况下,弱相互作用的石墨层使彼此相对滑动更容易。

碳黑-猪油的混合物是早期应用固体润滑剂的一个例子,石墨和其他固体润滑剂(如钼的二硫化物和硼的氮化物)至今还在广泛应用。它们可与油联合使用,当用液体润滑剂出现问题时(如在宇宙飞船中);也可单独使用。

#### 四、今日摩擦学

本世纪 80 年代初, G. Binnig 和 H. Rohrer 发明了扫描隧道显微镜,接着又制成了原子梯度力显微镜,不知不觉地促使摩擦学进入了一个基础研究的新时期。梯度力显微镜(LFM)首次提供了在滑动中监测作用在单纯粗糙表面的力的可能性。在纳米测量范围内,这些力不大于几个纳牛顿( $10^{-9}N$ ),它们是摩擦性能的基础。近十多年 LFM 的测量清楚地表明,在纳米范围,库仑的两项附着模式比 Amontons 的单一模式更有用处,因为附着作用在低负荷中起主要作用。

尽管摩擦力的根本原因仍在探索中,但无疑它涉及到机械的和化学的作用。通过运用摩擦图象提供了高空间分辨率的化学资料(对许多系统来说,用其他的表面成象技术是不易得到的), LFM 推动了化学介入摩擦的研究,近年来,大量的摩擦化学图象的例子在文献中出现。

一种特别有趣的观测是利用 LFM 研究只有几个原子级光滑、清洁的表面,它关系到粘住-滑动现象,即快速停止-起动的现象。这些运动对应着宏观世界里的一些熟悉的现

象,如制动器发出啸声、门的辗轧声和小提琴弦的乐声。这表明粘附-滑动不仅发生在宏观世界,也发生在原子尺度,如 LFM 的探针从一个势阱到另一个势阱横扫表面。在附着状态下,两个相互作用的物体是静止的,粘附-滑动运动可看做静摩擦状态延续的结果。

Israelachvili 利用表面张力仪获得的数据提出了一种有趣的机制来解释润滑系统中的粘附-滑动现象,该仪器借助干涉的方法,具有亚纳米的精度,能让原子量级平整的云母表面接触,在他的模型中(见图 3)薄流层内分子有序-无序的转换被认为是粘附-滑动运动的原因。由于过于卷入粘附-滑动运动以致不能形成有序的表面结构的那些特别分离出来的分子,作为分子薄层润滑表面时,表现出较平滑的滑动过程。当然对粘附-滑动现象的解释绝非仅此一种,许多不同的机制都可能是有道理的。在工程技术实践中,粘附-滑动现象只在 Stribeck 曲线斜率为负处才被观测到。

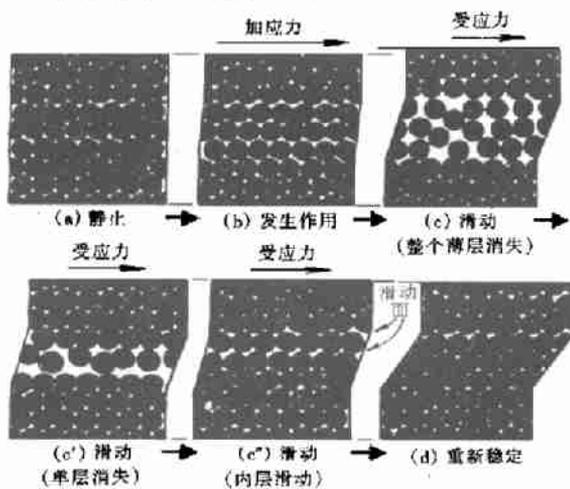


图3 分子的重排

尽管对两个相接触的物体分界面上发生的过程还缺少满意的微观解释,人们仍用巨大的努力来模拟摩擦现象。这种不足的一个原因是当物体尺度和它们之间的间隙变得很小时连续体力学失去效用。此外,材料的力学性质强烈地依赖样品的大小,而且由于相接触物体接合处可能很小,它们的力学性质可能与大尺寸的材料有明显的区别。纳米摩擦实验导致众多模

拟的出现,其结果反过来又导致进一步的实验.因为在实验和模拟两者之中,在某些情况粒子数量少到足以能比较这两种方法.

美国佐治亚州技术学院的 U. Landman 和他的同事们用分子动力学手段已经广泛地模拟了单一粗糙表面的接触.他们发现在不均匀固体表面高速下所约束和剪切的润滑剂中发生了分子有序化和层化的过程,他们还观察到摩擦作用下具有振动方式的相关性,以及由滑动的粗糙表面之间强烈的约束所引起的润滑剂的弹性—非弹性状态的动力学结构.

在摩擦过程中,能量是如何被消耗的,这是摩擦学中的核心问题之一.对无磨损的摩擦,声子和电子的作用是带走能量的两个好的载体.然而它们各自的作用仍有争议.近期的研究结果似乎是假设两种机制都可能对能量的耗散作出贡献,究竟哪一个起主要作用由系统决定.阐明声子的作用是 J. Krim 和他的同事们做的纳米摩擦实验的目标之一.他们用石英晶体微量天平(QCM)测量单层氮原子沿金的表

面被推动的作用力,发现液体薄层比固体薄层呈现更大的摩擦力. M. Kobbins 及同事们通过计算机模拟证实了这一结果,对氮在金的表面上移动的情形,声子似乎是能量损耗的主要原因.

近期 J. Krim 的研究小组再次用 QCM 研究温度对剪切应力的依赖关系.他们在一个 150nm 厚的铅基片上覆盖了 1—2 分子厚的氮,当铅基片被冷却到低于超导转变温度时,它与固体氮之间的摩擦力下降一半.这似乎是首次实验证实,导电的电子能对摩擦产生影响.在这种情况下,电的效应似乎对能量的损耗起决定作用.

综上所述,摩擦学不仅对工程师,而且对化学家及理论物理学家和实验物理学家来说都是一个专门的研究领域.借助分子动力学、扫描探针显微镜及表面科学联合的力量,更好地理解摩擦、润滑和磨损机理的前景应是非常美好的.

(编译自 Physics Today 1998.9 月号)

## 新书推荐

### 《人与太空》出版

肖佐 秦瑜 李良 主编 辽宁人民出版社 2000年1月出版 16开本精装 300页

《人与太空》这本书尽可能地收集了有关人类探索宇宙的事迹,在全面普及天文基础知识的同时,介绍了宇宙科学的发展足迹,尤其是以彩色插图的形式展示了历史上的重要的发现和天文仪器和人物形象.书中对于 20 世纪重要的天体物理事件、空间科学技术等均有涉猎.这本书分为“坐地巡天”、“探索太阳系”和“浩瀚的宇宙”三大部分,各部分的主要章节是“人类和星星、观察斗转星移、仰望四季星空、从地心

说到日心说、光谱分析窥天机、太阳是否在缩小、现代星云说、人类活动与大气污染、生机勃勃的空间物理学、迷人的火星、太空奇观、天涯三行星、恒星大世界、太空中的星云、举头望银河、数不清的宇宙岛、河外星系与哈勃定律、宇宙的创生和演化、类星体之谜、太空中的巨洞、发给外星人的电报、寻找宇宙反物质和暗物质、茫茫宇宙觅知音,等等.”

需要邮购此书的读者可通过邮局汇款,邮购每本 115 元(含邮资),汇款地址为 北京西直门外大街 138 号天文馆,李锦萍收. 邮政编码 100044. 联系电话(010)86731198,电子信箱: li@mail. east.net.cn

(李明涓 供稿)