

摩 擦 磨 损 粘 着 与 润 滑

赵玉和 等译

17.1

成都科技大学出版社

摩擦·磨损·粘着与润滑

原著. [美] 费德曼

编译. 赵玉和
朱根法

校核. 黄贵根

成都科技大学出版社

一九八八年五月

内 容 提 要

本书简述了摩擦学的基础理论,通过各种材料在不同情况下的试验,揭示出不同材料摩擦表面形貌特征及磨损机理。书中分标了摩擦、边界润滑、固体润滑等理论,介绍了磨损设计的步骤和方法。

本书适合大专院校从事摩擦学研究的师生阅读,亦可供工程技术人员在机械设计和选择材料时参考。

摩擦·磨损·粘着与润滑

赵玉和 朱根法 编著

成都科技大学出版社出版

四川省新华书店 发行

成都科技大学印刷厂印刷

开本 787×1092 毫米 1/32 印张: 4.5

1987 年 12 月第 1 版 1987 年 12 月第 1 次印刷

字数: 25 千字 印数: 2500

ISBN 7-5616-0211-1/TU·6

定价: 0.78 元

译 序

摩擦学是70年代兴起的一门边缘科学。它主要研究材料摩擦、磨损的特征，探讨磨损的机理，寻求最佳的设计和选材方法，以延长各类机器和设备的使用寿命、节约能源和材料。摩擦学内容广泛，涉及到物理、化学、数学、力学、材料学、机械学和其它有关的专业课程。

我国在80年代初，有相当多的大专院校在机械专业的某些课程中都增设了摩擦学的内容。中国机械工程学会摩擦学委员会也经常组织国内外的学术交流，聘请国外专家来华讲课。本书是根据美国著名摩擦学教授鲁德曼来华讲课的讲稿进行编译的。我们把译本奉献给从事摩擦学研究、教学、设计的科技人员，以便为进一步促进我国的摩擦学研究尽微薄之力。

本书由赵玉和、朱根法编译，成都科技大学黄贵根教授审校。由于我们水平有限，书中可能有不恰当的地方，请读者不吝指教。

编译者

1987年10月

序 言

1. 引言

从机理方面分析，摩擦与磨损是同时发生的。研究摩擦的目的是为了控制摩擦。人们希望减少摩擦、降低磨损，并将磨损控制到最小值。

减少摩擦在许多地方是有利的，例如，在轴承中可防止过热和维持最小的动力消耗；在拉丝时可增加截面的通过量并获得较高的光洁度；船舶下水时滑道可保持最小倾斜角等等。

通常人们很少想到但又同样重要的现象，是在某些场合下需要增加摩擦。例如，在制动器和离合器表面、轮胎和道路表面、绳索的联接处……就是有这样的需要。

与减少或增加摩擦完全不同类型的是控制摩擦。我们所说的控制摩擦，是指在所有的时间内，在整个生产过程中都能够得到同等程度的摩擦。即在一定温度、滑动速度湿度和其他环境条件下，摩擦控制应是连续的。如纺织品及纺织机械中织物的张紧度就必须重复连续控制；自动制动器的旋转闸既要保证制动又要制动力最小。

2. 研究摩擦、磨损的意义

研究摩擦和磨损的重要性大体上体现在以下六个方面：

(1) 摩擦和磨损耗费问题。据世界统计，磨损造成的消耗价值每人每年在 25~250 美元之间。衣服、轮胎、鞋

子、手表等的磨损，可以逐项地进行计算，然而，对于诸如公路、卡车、飞机、扫雪机和修树机等磨损价值的准确估计，则是比较困难的，但是，产品在生产过程中引起的机械磨损和更新的消费却是相当可观的。

(2) 摩擦、磨损与产品销售问题。如果美国的某些产品比其它国家的磨损快，因而在国外市场的销售量减少，直接影响对外贸易。如果装置经常损坏，则需要更多的修理人员，这对生产不利；如果装置长期不能使用，必然是一种经济损失；装置性能的下降也将带来隐患。例如推土机导轨的磨损，会使推土机急剧转弯的性能及生产效率大大降低。

(3) 机械寿命问题。最典型的例子是汽车，它常常因为几个重要部件磨损而报废。一辆汽车是否报废，主要取决于修理费用。更换零件要受折旧率的影响，而折旧率又与其它因素有关，这可能远远大于它本身的经济价值。

(4) 国家安全问题，军队装备使用周期的缩短或装备效率的下降会减弱军队的战斗力，如飞机的引擎和大炮的炮管等。磨损了的齿轮发出的声音也易被监听装备测出。历史证明，第一次世界大战前研制的高速切削钢和第二次世界大战前夕碳化钨切削材料的发展，极大地帮助人们赢得了战争的胜利。

(5) 危害人们生活的问题。人造关节、人工心脏等器官的磨损会影响其使用功能，又如车辆磨损发出的格格声和拉丝中的磨损噪音会使人不安，磨损的手表走时不准而常使人上班迟到，用磨损的剃刀修面会给面部留下伤痕……这些都给人们的生活带来危害。

(6) 磨损引起事故的问题。早些年已经指出磨损(例如

制动器的磨损)是汽车发生事故的主要原因。另外,电线绝缘层的磨损和开关的损坏使人面临着电击的危险,绳索和夹具的磨损会产生断裂,磨损了的钻头会被咬断,这些都常常会造成危害。

3. 摩擦和磨损对润滑技术的影响

摩擦和磨损问题常用润滑的方法来改善,但在润滑过程中又引起许多问题。润滑剂控制系统需要有复杂的机械,如防止润滑剂逸出需要密封装置;为了消除摩擦所产生的热的危害,(如在热量不易导出的地方会造成液体润滑剂的沸腾),需要增加冷却装置。

润滑消失或失效的地方,必然造成摩擦和磨损。由此引出如下的结论:如果各类原子没有内在的或天然粘在一起的倾向,那么就不存在摩擦和磨损。由近40年的研究结果证实这一结论,导出了粘着摩擦理论的概念。由于一个表面与其它表面的接触磨损,粘着作用也就同时包含在其中了。有趣的是粘着也与润滑效果和减少磨损息息相关。在此情况下粘着与其它的因素,如各类润滑剂的吸附作用,氧化膜的韧性和聚合物涂层对金属底材的附着等等都有关。

摩擦、磨损问题已涉及到人们的实际生活,因而推动了有关的试验研究工作,为人们提供了大量的单一材料和复合材料按摩擦、磨损性质分类的文献资料。另外还提供了润滑剂用于各种操作条件下的成功经验。但是,经验有它的局限性。只有试验得到的结论,才是比较可靠的。在新的条件下,经验可以用于某些推测和假说。由于摩擦、磨损和润滑的机理非常复杂,对新的问题要找到一个合适的解答还需要

作艰巨的努力。人们正在开展有关的基础研究，而基础研究与试验往往是不可分割的。虽然许多试验过程基本相同，但相似的试验仍然要作，这是因为结论互相矛盾的老问题依然存在。

一些著名的科学家和工程师早已致力于基础研究工作。1699年 Amonton 和 1781年 Coulomb 先后提出了几个早期理论。从 Coulomb 时期到 19 世纪，许多学者曾做了一些系统的研究。直到 1883 年，Beauchamp Tower 和 Osborne Reynolds 才在流体动力润滑方面提出了一些重要的而有影响的结论。1910 年，物理化学家 W.B. Hardy 试图解释一部分单层润滑剂在金属表面存在的情况，摩擦研究才被重视起来。Hardy 的学生 F.P. Bowden 博士及其学生 D. Tabor 博士继续进行了有关研究，特别是由他二人合作进行的最有权威、最有创造性的研究活动，为摩擦和磨损学奠定了基础。

目 录

译序	(I)
序言	(i)
1. 引言	(i)
2. 研究摩擦、磨损的意义	(i)
3. 摩擦、磨损对润滑技术的影响	(iii)
第一章 固体表面的物理模型	(1)
1. 固体表面	(1)
2. 扫描电镜	(2)
3. 工艺表面	(3)
4. 表面粗糙度的测量	(3)
5. 表面变形	(4)
6. 表面动能学说—能量和应力	(4)
7. 吸附、吸收、氧化	(7)
8. 表面膜的生成率和它如何干扰粘着	(8)
第二章 表面接触	(11)
1. 接触问题	(11)
2. 接触面积	(14)
3. 金属的恢复	(17)
4. 金属材料的粘着(现象和机理)	(18)
第三章 摩擦机理	(21)

1. 早期现象的观察.....	(21)
2. 早期理论.....	(21)
3. 摩擦粘着理论的发展.....	(23)
4. 摩擦粘着理论的局限性.....	(30)
5. 弹性、塑性和粘弹性.....	(33)
6. 粘弹性的补充.....	(35)
7. 通过表面熔融来控制摩擦.....	(45)
8. 滚动阻力或滚动摩擦.....	(46)
9. 滚子的滚动.....	(50)
10. 复合机理.....	(50)
11. 粘滑.....	(51)
12. 杂题.....	(52)
13. 电阻和热阻.....	(53)
14. 其它结论.....	(54)
15. 滑动接触的表面温度.....	(55)
16. 抛光.....	(60)
第四章 摩擦(A).....	(61)
1. 概述.....	(61)
2. 粘着磨损.....	(64)
3. 磨料磨损.....	(67)
4. 辅助资料.....	(74)
第五章 润滑.....	(82)
1. 基本接触条件.....	(82)
2. 基本解决办法.....	(82)

3. 实际解决办法.....	(82)
4. 流体油膜润滑.....	(83)
5. 边界润滑.....	(87)
6. 固体润滑.....	(91)
第六章 滚动轴承	(97)
第七章 磨损 (B)	(104)
1. 耐磨设计的一般原理.....	(104)
2. 除了选择材料以外的磨损寿命设计步骤.....	(108)
3. 磨损方程.....	(111)
4. 抗磨材料的选择步骤.....	(113)
5. 材料选择表.....	(122)
6. 文献目录.....	(130)

第一章 固体表面的物理模型

摩擦的经典解释之所以受到限制，是因为它没有充分说明原子量级的固体结构和表面性质。固体是简单的相当低速运动的原子群体，这已经可以从四种固体原子键合机理识别。即离子型的（充电原子）；共价的或者同极的（固定的价电子，直接结合）；金属粒子价电子的（价电子不是固定的）和范德华氏力的（Van der Waals）。

1 固体表面

固体表面可简单地定义为不连续的晶格模型（复杂的定义必须考虑一个原子或亚粒子从这个区域到那个区域运动的可能性）。在晶格中，不连续性更明确地说是一个界面，例如，在真空中，金属的表面称为固体与真空界面；养鱼缸的内表面是玻璃与水的界面。然而，我们常常假设固体分界面的存在对固体没有影响，把这种界面想象为固体表面。后面将指出“环境”能够影响固体的性质，所以近似的说法常常是不准确的。

金属晶格模型中不连续表面产生一个原子级的光滑表面。由(100)、(110)、(111)组成的表面是最简单的表面，也是一种特殊情况。低分度铣床铣出的表面是不平行的，这些简单的晶面，可能由比较复杂的定向平面构成，但必须使平均原子表面平行于整体的平面。研究热效应的作者在粗糙的氧化皮上已观察到这一现象，用耐熔金属 W、Mo、T...

C。所组成的针状物在离子级显微镜下也观察到了这种现象。常用的有钨。

2 扫描电镜

1951年 E. W. Muller 提出了 He 原子在强电场中的情况，见图 1：

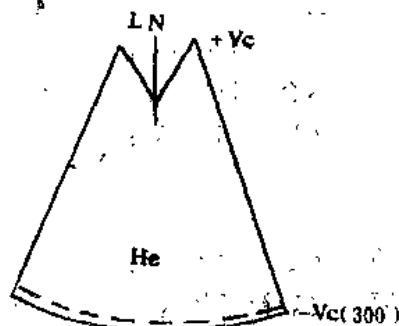


图1 He原子在强电场中

如果带电的 He 原子在强电场 ($450 \times 10^6 \text{ v/cm}$, 足以除去任何吸附膜) 的尖端射向一个原子, 则正离子铁在与金属中原子的相同方向被推向屏幕, 分辨率为 $2 \text{ \AA}$ 。

一个原子光滑表面的产生可采用解理方法来完成。理想的解理仅限于几种材料。这种过程很简单, 只需要一把榔头和一把非常尖的凿子。离子晶体和云母能被解理。金属和聚合物也能被解理, 但不太理想, 其表面通常是不光滑的, 有些塑料常有表面变形。

实际上, 不可能要求广泛使用的原子具有光滑表面, 大概是因为不能持久地保持其表面干净, 这种情况是存在的。

3 工艺表面

产生工艺表面的方法很多，玻璃的表面，由熔融后固化而产生的光滑表面在 $1\mu\text{m}$ 以内。由加利福尼亚州 Michelson 实验室 H. E. Bennett 提出的题为“单色光粗糙度测量仪”的报告中，对光学抛光玻璃表面的不平度有如下的典型数据：

熔融石英（反射罩进料） $2.7\text{\AA}$

熔融石英 $9.6\text{\AA}$

硼酸硅玻璃 $14\text{\AA}$

平板玻璃 $18\text{\AA}$

DF₂ 氧化铅玻璃 $41\text{\AA}$

地面粗糙度在 $2.5 \times 10^{-6} - 2.5 \times 10^{-1}\text{mm}$ 之间。有些材料在抛光的金属模中铸造而具有金属模的粗糙度，通常在 $(2.5 - 25) \times 10^{-6}\text{mm}$ 的范围内。好的机加工表面有 $2.5 \times 10^{-6} - 2.5 \times 10^{-2}\text{mm}$ 的粗糙度。压制和拉制表面粗糙度在 $2.5 \times 10^{-3} - 2.5 \times 10^{-2}\text{mm}$ 的范围内，砂型铸件表面的粗糙度在 $2.5 \times 10^{-2} - 0.25\text{mm}$ 之间。

很明显，上面所说的粗糙度与以埃($\text{\AA}$)为单位的粗糙度相比要大得多，原子模型在这么大的粗糙度面前已失去了它的意义。然而，大多数相互接触的表面和摩擦面均是相当粗糙的，故将花较多的时间来研究。

4 表面粗糙度的测量

表面粗糙度的测量不能使人人都满意。再则，用一个表面的基础术语来定义时也遇到一些困难。然而，我们仍可以用几种方法命名来适用于描述表面，如它们的位置（部件尺

寸)和粗糙度。一些测量方法包括立体显微镜、暗场照明器、反射光强度、最低角度下的单色光(此时光源的灵敏度是 $\Delta h < \lambda/8$)、电容量、灵敏针(检测点有各式各样的解释)、空气泄漏、光学切割(光片)、尖端截面干扰和电阻(Matsunaga), 这些都是现在测量粗糙度常用的方法。

5 表面变形

可塑材料的断裂、机械加工、研磨和抛光所产生的表层, 有严重的塑性变形, 也可能有大量的裂纹。塑性变形意味着产生残余应力, 裂纹增大粗糙度并引起原始的断裂。在金相试验抛光时, 很明显, 金属的真实性质被完全不同于底层的膜复盖住。抛光金属表面的构造由George Beilby研究, 他发现抛光表面已明显地失去了结晶性质, 这点将在后面讨论。

当表面有氧化皮时, 一些微小的氧化皮将影响到次层表面的强度和吸附情况。

6 表面动能学说——能量和应力

一个固体表面模型。将一个原子p放在 $100\text{F}\cdot\text{C}\cdot\text{C}$ 晶格(面心立方晶)格的平面内, 为了平衡所有的A原子必须排斥p(用力a)而B原子必须吸引p(用力b), 见图2, 所以在y向,

$$b + 4a \cos \frac{\pi}{4} = 0 = b + 4a \frac{\sqrt{2}}{2}$$

或者 $b = -2\sqrt{2}a$

如果在y向上方制造一个表面, 则

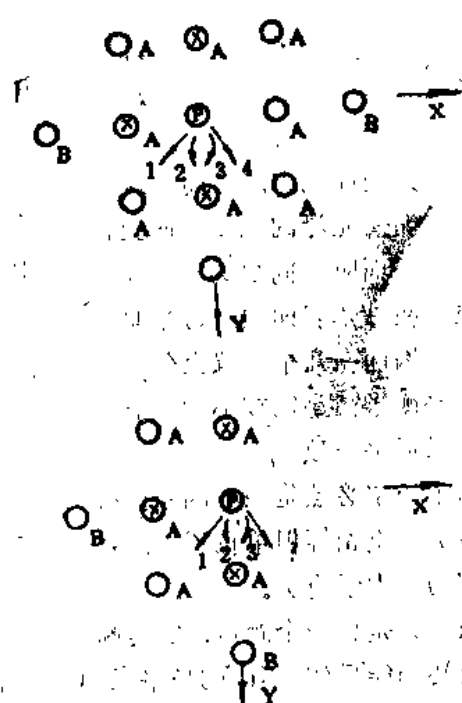


图2 原子p在100F-C-C晶格平面内力平衡

$b + 3a \cos \frac{\pi}{4} \neq 0$, 这将意味着表面原子性质的改变,
实际上

$$\begin{aligned}
 -4a \cos \frac{\pi}{4} &= b + 3a \cos \frac{\pi}{4} \\
 &= -\frac{\sqrt{2}}{2} a \left(= -4a \frac{\sqrt{2}}{2} + 3a \frac{\sqrt{2}}{2} \right)
 \end{aligned}$$

这样，在 $\{100\}$ 方向、 $\{100\}$ 表面的原子上，作用着一个张力 a （是一个推力），同样在 $\{1\bar{1}0\}$ 方向上、 $\{100\}$ 平面上，有一个张力“ a ”，在 $\{110\}$ 方向、 $\{111\}$ 平面上有一个压缩力“ a ”。

这些数值称为表面应力，然而，这种应力在一段时间后将扩散释放出来而使光滑的原子表面变粗糙。

另一个解决表面应力问题的方法即用Pauling共价电子亲合力的假说。在晶体表面中，每个原子在它的旁边都有几个邻近的原子。因而在几个位置上分布着相同的亲合力，所以表面原子的平衡半径是比较小的，而且表面是张紧的。后者与试验的结果近乎一致。

表面应力不一定必然是经典的表面张力。有些学者认为：在液体中两者数字上相等但单位不同；在固体中数字上是不相等的，它们与热力学有关。

表面自由能又是另一个题目，它是断裂或热断裂产生一个新表面所需要的能量值。不同的晶格表面有着不同的能量。表面有效能量问题是热力学上的研究课题。在今天，这些仍是很不可思议的。

表面张力的单位是 N/m （牛顿/米）

表面自由能的单位是 J （焦耳）

液体的表面应力和表面自由能数值是相等的。

由热力学可知，力和能量是没有多大差异的，是可以互相换算的。

表面张力可以用弦线法测量，表面应力还不能测量。

固体的表面能用溶解率来测量。

幅射点的范围、弦线拉力、粉末和容积的溶解热比较