

## 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。书中分析了摩擦、边界润滑、固体润滑等理论,介绍了摩擦设计的步骤和方法。

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 版 1987年12月第 1次印刷

字数: 95千字 印数: 2500

---

ISBN 7-5616-0211-1/TU·6

定价: 0.78元

# 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 )
<b>第一章 固体表面的物理模型 .....</b>	<b>( 1 )</b>
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 )
<b>第二章 表面接触 .....</b>	<b>( 11 )</b>
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 )
<b>第三章 摩擦机理 .....</b>	<b>( 21 )</b>

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 磨损(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)
<b>第六章 滚动轴承.....</b>	<b>(97)</b>
<b>第七章 磨损 (B) .....</b>	<b>(104)</b>
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  $W$ 、 $M_0$ 、 $T_0$ 。

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：

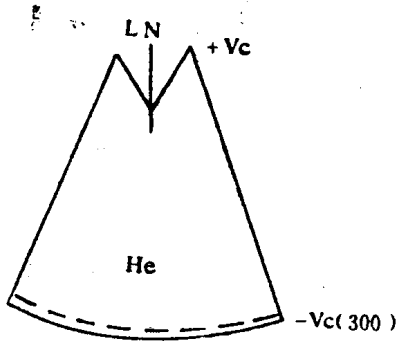


图1 He原子在强电场中

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原因。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 Å
熔融石英	9.6 Å
硼酸硅玻璃	14 Å
平板玻璃	18 Å
DF <sub>3</sub> 氧化铅玻璃	41 Å

地面粗糙度在 $2.5 \times 10^{-6} - 2.5 \times 10^{-4} \text{mm}$ 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 $(2.5 - 25) \times 10^{-5} \text{mm}$ 的范围内。好的机加工表面有 $2.5 \times 10^{-4} - 2.5 \times 10^{-3} \text{mm}$ 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(Å)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 $100F \cdot C \cdot C$ 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



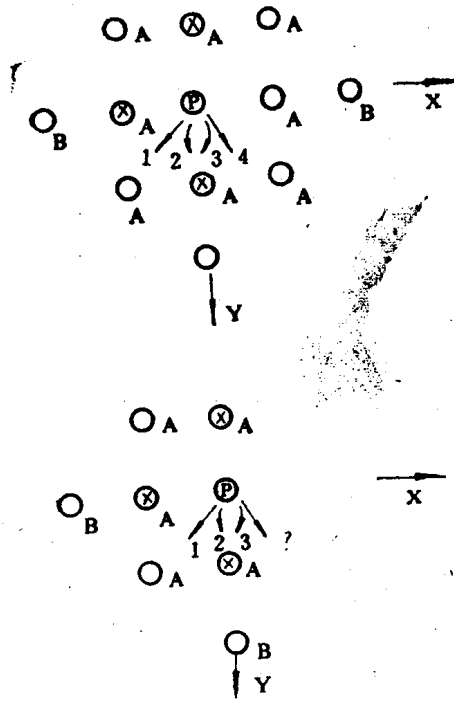


图2 原子p在100F·C·C晶格平面内力平衡

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

实际上

$$-4a \cos \frac{\pi}{4} = b + 3a \cos \frac{\pi}{4}$$

$$= -\frac{\sqrt{2}}{2}a \left( = -4a \frac{\sqrt{2}}{2} + 3a \frac{\sqrt{2}}{2} \right).$$

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

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  $\text{N/m}$ （牛顿/米）

表面自由能的单位是  $\text{J}$ （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。

辐射点的范围、弦线拉力、粉末和容积的溶解热比较

等，这一系列概念仍在研究中，虽然到今天仍没统一，但我们至少对下面情况是十分清楚的：

(1) 产生新的固体表面需要能量；

(2) 表面的原子排列与里面是不同的。例如，卤化碱顶层和第二层之间的空间比正常值少 5%，第二层和第三层之间接近于正常值。而表面层比第一层略厚。一些金属在分离层普遍大于 5%。

表面影响的某些性质是恒定的，如折射、反射、催化、毛细管作用等。部份性质受表面摩擦、磨损、电子辐射、粘着、 $\sigma_s$ 、 $E$ （屈服强度、杨氏模量）的影响。这些表面应力经常出现且产生了一些不可避免的后果。表面几乎经常存在着非金属的复盖层。要完整地说明这个表面，需要考虑这些影响因素。

## 7 吸附、吸收、氧化

一种物质的原子或分子能够依附于另一种物质的过程称为吸附。我们可以看到，固体表面有些不稳定的链接，这些链接能将原子带到影响区域。吸附过程经常伴随着表面能的减少。

有两种吸附，即物理吸附和化学吸附。物理吸附包括范德华氏力，它包含的能量与气体液化的能量为同一量级，即

等式中  $Q < 4.186$  千焦耳/摩尔（反应率）， $R \propto e^{-\frac{Q}{RT}}$

（气体常数  $R$  等于在 1K 时气体转化总能量的  $\frac{2}{3}$ ），而且很容易可逆（随温度和气体的压力变化）。化学吸附包含着与

化学反应同一量级的作用能，即41.8~418千焦耳/摩尔。因为它涉及到化学结构的变化，所以是不可逆的或可逆有很大困难的。

有许多理论和等温学说说明了吸附过程是怎样发生的。然而，对我们的要求大概用手册就足够了。在手册中， $p$ 和 $c$ 部份是描写生成热和溶解热的，据此我们通常可估计某一气体能否发生吸附。

如氧凝结在铜上可能是化学吸附，因为 $\Delta H=161.2$ 千焦耳/摩尔（对二价铜）， $\Delta H=167$ 千焦耳/摩尔（对一价铜）。铜氯化未列入，因它很象形成物理吸附层。氧在铁— $\text{FeO}$ 上（低价的） $\Delta H=798$ 千焦耳/摩尔；其他的数值， $\text{PtO}$ ， $\Delta H=71.2$ 千焦耳/摩尔； $\text{Ag}_2\text{O}_2=22.6$ 千焦耳/摩尔，金很小。

附着气体和非金属或金属间的薄膜是一个有争议的问题，我们仅估计这层膜影响的可能性。

## 8 表面膜的生成率和它如何干扰粘着

根据 Langmuir 的假设，只有撞击未复盖表面部份的分子才保持着粘附，其余部份蒸发（即为粘性因子 $I$ ）。于是，任何时候的冷凝率 $\rho=\rho_0(1-\theta)$ ，这里 $\rho_0$ 是原始的冷凝率，

$\theta=\frac{N}{N_0}$ ， $N$ 是每单位面积上凝结的分子数， $N_0$ 是单层每单位面积含有的最大分子数。 $\rho$ 是单位面积冷凝原子数的变化

率，即  $\rho=\frac{dN}{dt}$ ，也等于  $N_0\frac{d\theta}{dt}$

代入给出：

$$\rho(1-\theta) = N_0 \frac{d\theta}{dt}$$

解上式  $\ln(1-\theta) = -\frac{\rho_0}{N_0} t$

此式中  $\rho_0$  取决于温度和压力。  $N_0$  取决于气体量。 在平均自由途程压力为133.2帕、每升约有  $3.54 \times 10^{19}$  个分子的情况下，得到：

$$\rho_0 = \frac{4.66 \times 10^{24} \cdot p}{\sqrt{MT}}$$

式中： P——压力，单位为帕。

M——分子重量（大分子运动更慢）。

T——温度K。

{Pirani and yarwood, Princ of Vac Eng•r Reinhold 1961}.

$N_2$  在394°K和  $1.33 \times 10^{-4}$  帕时结果：

%覆盖的分子数	t(秒)	%覆盖的百分数	t(秒)
25	0.8	90	6.0
50	1.7	95	7.5
75	3.5	99	12.0

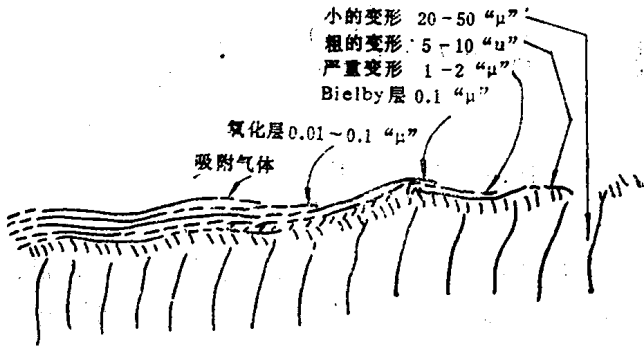


图3 表面示意图

图3中:  $1 \text{ "}\mu\text{"} = 10^{-6} \text{ 米}$

$25.4 \text{ "}\mu\text{"} = 25.4 \times 10^{-6} \text{ 米。}$

## 第二章 表面接触

### 1. 接触问题

一个表面常常是粗糙的，所以接触只能发生在有限的点上，因而接触点上的压力是非常高的。如果采纳某些关于形态性质的假设，那末我们就可作有关接触面积的假定。

从一般观点来看，接触问题可能是有关弹性和塑性的问题。我们可以选择一个在两种范围内都能得到结果的模型。锥形只有侧面接触，故不能用锥形作模型。较广泛使用的模型为球形。球形相互接触的半径为 $a$ ，其式为：〔铁摩辛柯：《弹性理论》〕。

$$a = \left\{ \frac{3W \left( \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) r_1 r_2}{r_1 + r_2} \right\}^{\frac{1}{3}}$$

式中 $W$ 是负荷， $\nu$ 是泊桑比， $E_1$ 、 $E_2$ 分别为两球的杨氏弹性模量， $r_1$ 、 $r_2$ 是两球的半径。

如其中一个为平板 即 $r_1 = \infty$ 则

$$a = \left\{ \frac{3}{4} W r \left( \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \right\}^{\frac{1}{3}}$$

如果一个物体很硬，且软的一个为平板，则

$$a \cong \left\{ \frac{3}{4} W r \left( \frac{1-\nu^2}{E} \right) \right\}^{\frac{1}{3}}$$

在这些方程中，泊桑比的影响并不大，对上述两种特殊

情况方程可以写成：

$$a = \nu_0 \left( \frac{W \cdot r}{E} \right)^{\frac{1}{3}}$$

接触面上的压力分布是椭圆形的，平均压力  $P_m = \frac{W}{\pi a^2}$ ，

最大压力  $q_0$  是平均值的  $\frac{3}{2}$ ，即  $\frac{3}{2} \cdot \frac{W}{\pi a^2}$ 。上式中的  $\nu_0$  值如下。

	一球压在平板上	一球压在较软
$\nu$	二者性质相同的 $\nu_0$ 值。	的平板上的 $\nu_0$ 值。
0.05 (铍)	1.04	0.825
0.3 (大多数普通金属)	1.11	0.88
0.5 (橡胶)	1.14	0.905

我们引入另一组与上述方程相似的方程。两个物体接触的距离，

$$\beta = \left( \frac{9\pi W^2 \left( \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)^2 \cdot (r_1 + r_2)}{r_1 r_2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

对平板则

$$\beta = \left( \frac{9\pi W^2 \left( \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)^2}{r} \right)^{\frac{1}{3}}$$

用一个硬球压在平板上，接触中心下面的应力分布如图4所示。最高剪切应力在  $\sigma_z$  和  $\sigma_r$  之差最大的点，在深度  $0.5a$  处（对平板，0.5 是很大的）。计算最大剪切应力为  $0.47P_m$ ，这里  $P_m = \frac{2}{3}q_0$ ，即  $\sigma_z - \sigma_r = 0.47P_m = 0.31q_0$ 。



{See Tabor, The Hardness of metals, Oxford(1951)}.

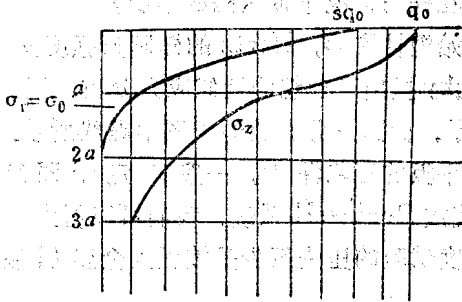


图 4 硬球压在平板上, 接触中心下的应力分布

塑性变形首先发生在剪切强度  $\frac{1}{2}Y$  的点上 (满足了 Tresca 和 Haber Mises 准则, 因  $\sigma_r = \sigma_\theta$ )。

$$\text{即 } 0.47P_m = 0.5Y^*$$

这样, 塑性变形发生在  $P_m = 1.1Y^*$  时。

人们压一个钢球, 对 15mm 的球用力 44.5 牛顿,  $q_0 = 6.894 \times 10^8$  帕, 这相当于锻钢的屈服强度。对球体连续加载, 小的塑性变形区域随之增长, 平均压力有所增加。试

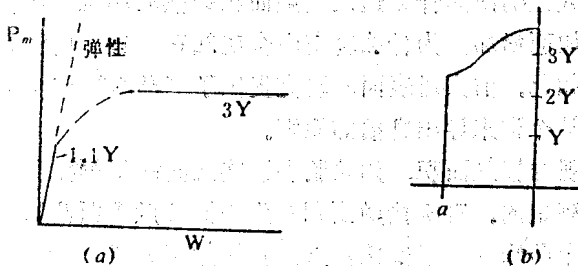


图 5 钢球受压时,  $W$  与  $Y$  的关系

注:  $Y^* =$  屈服强度。