

高等学校教学参考书

摩擦与磨损

齐毓霖 编

机械零件设计丛书

高等教育出版社

高等学校教学参考书

机械零件设计丛书

摩擦与磨损

齐毓霖 编



高等教育出版社

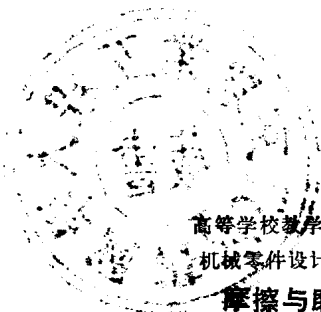
内 容 提 要

本书是《机械零件设计丛书》的一册,是在高等工业学校机械类机械零件设计基本教材的基础上,为了适当加深加宽有关摩擦与磨损的知识而编写的。全书共分4节,包括固体的表面性质、干摩擦、边界摩擦和磨损等内容。

本书可供有关专业学生学习之用,也可供有关教师和工程技术人员参考。

本书经机械零件教材编审小组委托华中工学院余俊教授和天津大学邱宜怀教授先后审阅。

2264/04



高等学校教学参考书

机械零件设计丛书

摩擦与磨损

齐毓霖 编

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京印刷一厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 2.875 字数 69,000

1986年3月第1版 1986年3月第1次印刷

印数 00,001—45,150

书号 15010-0719 定价 0.62元

基本符号

A	名义接触面积	f	摩擦系数
A_r	实际接触面积	f_s	静摩擦系数
F	载荷	f_k	动摩擦系数
R_a	轮廓算术平均偏差	k	磨损常数
R_q	轮廓均方根偏差	t_{cr}	边界膜临界温度
R_z	微观不平度十点高度	v	速度
S_m	轮廓微观不平度的平均间距	x	滑移距离
S	轮廓单峰平均间距	σ	比表面能
T	摩擦力	σ_B	强度极限
V	磨损体积	σ_S	屈服极限
W_c	内聚功	τ_b	粘结点剪切强度极限
W_{ad}	粘附功	τ_S	粘结点剪切屈服极限
W_f	分子摩擦功	$\eta_s = A_r/A$	
α	两粗糙面的相互接近量	ξ	相对耐磨性

前 言

摩擦与磨损是研究具有相对运动的、相互作用的表面间的有关理论与实践的一门科学。摩擦是两个相互接触的物体在外力作用下,发生相对运动(或有相对运动趋势)时产生切向运动阻力的物理现象,而磨损是摩擦的结果,润滑则是降低摩擦和减少磨损的重要措施。

在古代,人类就自觉或不自觉地解决摩擦问题。在我国周朝的诗经上就有用油涂在车轴上使车跑得轻快的记载。公元前1650年在埃及的浮雕上刻有在被搬运的重物和垫板之间涂润滑油的情景。公元前850年人们在搬运重物时,就用滚动摩擦代替了滑动摩擦。

对摩擦现象作宏观的研究开始于1508年欧洲意大利文艺复兴时期。当时,达·芬奇(Leonardo da Vinci)第一次提出:摩擦力与重量(即垂直力)成正比,与接触面积大小无关。他还提出,摩擦力的大小为该重量的四分之一。到1699年,法国学者阿蒙当(Amonton)发表了两条摩擦定律。大约在1785年,库仑(Coulomb)提出了第三条摩擦定律。这三条定律一直沿用到今天,后人统称为阿蒙当-库仑摩擦定律,即

- (1) 摩擦力与法向载荷成正比;
- (2) 摩擦力与名义接触面积无关;
- (3) 摩擦力与滑动速度无关。

人们在把有关摩擦的一些现象归纳为一般定律的同时还研究了摩擦生成的机理。十八世纪以前,人们认为两个相互移动的物体间的摩擦是由于表面凹凸不平的微峰相互咬合而造成的。1734

年英国物理学家德萨古利埃 (Desaguliers) 提出分子间的吸引力是生成摩擦的原因。1940年英国科学家鲍登 (Bowden) 和泰博 (Tabor) 提出摩擦是由于微峰间接触点上的粘附作用造成的。

随着工业生产的不断发展, 人们愈来愈深刻地认识到摩擦消耗了大量能量。有人估计, 全世界有 $1/2 \sim 1/3$ 的能量消耗在摩擦上。早在 1956 年召开的美国汽车学会年会上, 就有人指出, 汽车发动机内的摩擦消耗了动力的 30%。

零件的磨损直接影响机器的性能和使用寿命。据统计, 大约有 80% 的坏损零件是由于磨损造成的。磨损所造成的经济损失是十分惊人的。我国在 1957 年, 曾对一机部的行业产品磨损情况进行了调查, 发现国家分配给机械行业的钢材有一半是用于修配件的制造, 而配件中大部分是用于维修。例如, 1974 年我国的汽车年产值为 16.6 亿元, 用去的钢材为 27 万吨; 而配件的产值为 14 亿元, 耗用钢材 23 万吨; 三分之二以上的配件用于维修。在工业发达的国家也有类似的调查和统计数据。例如, 美国技术评议局报导, 美国金属切削机床每年维修费用为 7.5 亿美元; 一架海军值勤飞机每飞行小时的磨损值为 750 美元, 而其燃料费只有 376 美元。1964 年, 英国科学家约斯特 (Jost) 和有关专家对英国润滑工程的现状进行了调查, 并在 1966 年正式提出研究报告, 建议建立摩擦学学科。

摩擦、磨损造成的经济损失是巨大的, 但是在减摩、抗磨方面所取得的成绩也是十分显著的。例如, 据英国统计, 现在汽车发动机的持续工作寿命为 25 年前的三倍。

当然, 摩擦和磨损现象也有有利的一面。例如人和车辆在陆地行走就是利用摩擦的原理; 人们还用磨粒磨损原理进行研磨加工等。

现在, 由于有高倍率观察仪器、精密的测试仪器, 人们开始对摩擦、磨损中的物理、化学等现象进行深入的研究。目前, 已经发

现的对摩擦、磨损过程影响较大的因素多达百个以上。所以仅仅从力学的范畴研究它们已经是很不够了，必须运用数学、物理学、化学、材料学和力学等学科知识对摩擦、磨损进行综合性的研究。本书就是本着上述的观点，扼要地介绍了有关摩擦、磨损的基本知识。

本书承华中工学院余俊同志及天津大学邱宣怀同志认真审阅，提出了很多宝贵意见，特此表示衷心感谢。

由于编者水平有限，错误及欠妥之处一定不少，希望读者批评指正。

齐毓霖

1985年3月于哈尔滨工业大学

目 录

前言	1
§ 1 固体的表面性质	1
一、表面的形貌及其表征方法	1
二、表面接触及实际接触面积	9
三、固体表面的物理化学性质	16
§ 2 干摩擦	23
一、干摩擦机理	23
二、影响干摩擦系数的因素	33
三、动、静摩擦系数和粘滑现象	39
§ 3 边界摩擦	42
一、边界摩擦机理	42
二、影响边界摩擦的因素	48
三、边界润滑膜的破裂	53
§ 4 磨损	59
一、粘着磨损	59
二、磨粒磨损	69
三、疲劳磨损	74
四、腐蚀磨损	78

§1 固体的表面性质

一、表面的形貌及其表征方法

摩擦和磨损现象都发生在固体表面层，所以对固体表面的形貌要进行深入研究。

凡是经过机械加工的表面都有大小不同、形状各别的凸峰和凹谷，即使是经过超精研磨的固体表面也都布满了凸峰和凹谷。图1是用激光干涉仪观察到的经过精密研磨后的光学平镜表面的凸峰和凹谷。

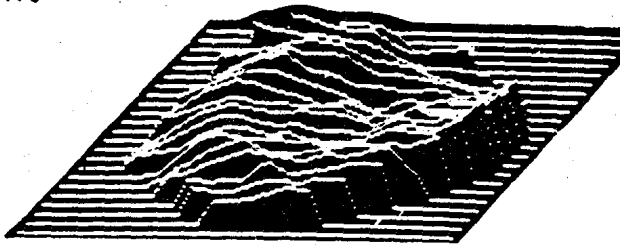


图1 光学平镜的表面形貌

表面的几何形态称为固体表面形貌。它对油膜很薄时润滑的有效性以及在油膜被破坏后凸峰间的接触状态都有很大的影响。

表面的几何形态是随机的，常用表面粗糙度表示，该参数有一维、二维和三维的。

用表面轮廓在高度方向的量来表示表面粗糙度的一维参数有以下几种。

(1) 轮廓算术平均偏差 R_a 。它是指在取样长度 l 内，被测轮

廓上各点至轮廓中线 mm 的距离 ($y_1, y_2 \dots y_n$) 绝对值 (图 2) 的总和的算术平均值。

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx$$

或近似为:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|$$

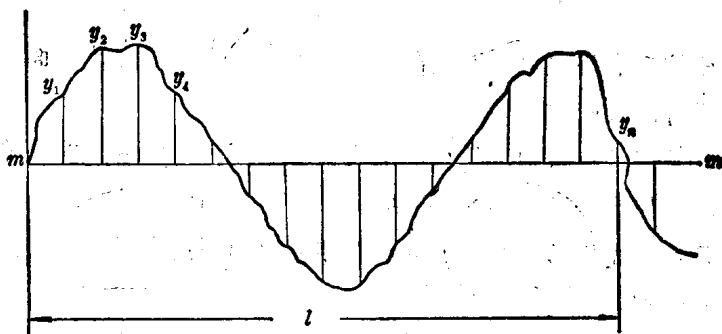


图 2 轮廓算术平均偏差

(2) 微观不平度十点平均高度 R_z 它是指在取样长度 l 内 5 个最大的轮廓峰高的平均值和 5 个最大的轮廓谷深的平均值之和 (见图 3)。

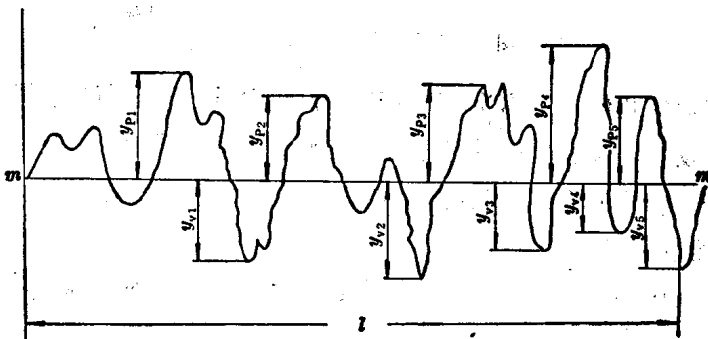


图 3 微观不平度十点平均高度

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 y_{pi} + \sum_{i=1}^5 y_{vi}}{5}$$

(3) 轮廓均方根偏差 R_q 它是指在取样长度 l 内轮廓偏距的均方根值。

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l y^2(x) dx}$$

上述三种参数仅反映了表面高度方向的粗糙度，它们并没有反映表面峰、谷轮廓的斜度、形状和其出现的频率的情况。所以，对于表面形貌不相同的表面，甚至可以测得同样的 R_a 或 R_q 值(图4)。为了克服这一缺点，可采用表面轮廓在水平方向的参数和二

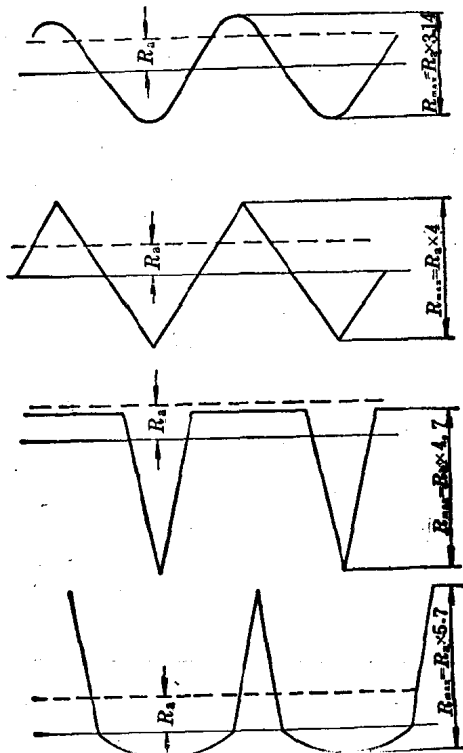


图4 相同 R_a 值时不同的表面形貌

维参数来补充评定表面的形貌。这些参数主要有：

(1) 轮廓微观不平度的平均间距 S_m 它是指在取样长度 l 内轮廓在中线 mm 上间距 p_{mi} 的算术平均值(图 5)。 p_{mi} 为含有一个轮廓峰和相邻轮廓谷的一段中线长度。

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_{mi}$$

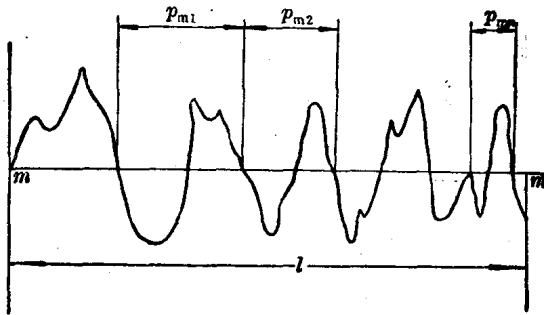


图 5 轮廓微观不平度的平均间距

(2) 轮廓单峰平均间距 S 它是指在取样长度 l 内轮廓的单峰间距 P_i 的平均值(图 6)。

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i$$

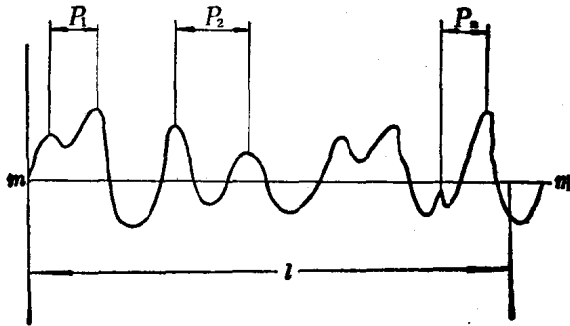


图 6 轮廓单峰平均间距

(3) 轮廓支承长度率 t_p 。它是指在取样长度 l 内，一平行于中线的线与轮廓相截后得到的各段截线长度之和与取样长度 l 之比(图 7 a)。 p 为轮廓最高峰点至截线间的距离。

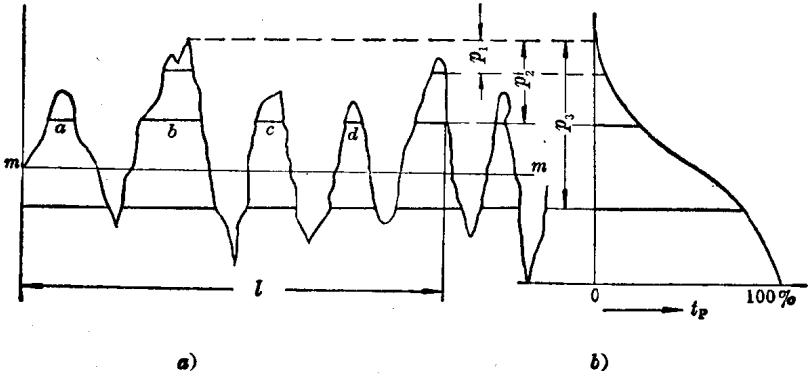


图 7 轮廓支承长度率曲线

$$t_p = \frac{a + b + c + d \dots}{l}$$

该参数对研究摩擦表面的接触状态和表面耐磨性是很有用

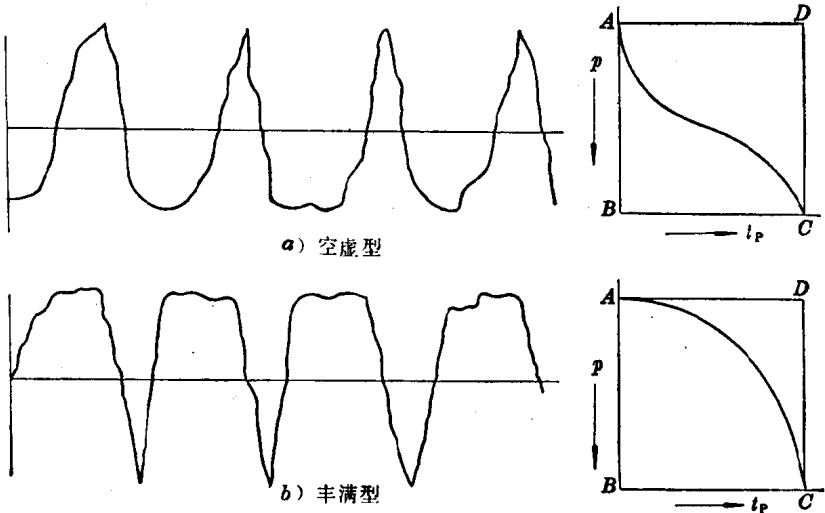


图 8 用轮廓支承长度率曲线表示轮廓的丰满型与空虚型

的。表示 t_p 和 p 的关系曲线称为轮廓支承长度率曲线(图 7 b)。它可表征表面轮廓线的丰满性和空虚性。很显然,丰满型轮廓线的耐磨性能要优于空虚型轮廓线。为了表征表面轮廓线的丰满性,可以用轮廓支承长度率曲线围成的面积 ABC 与矩形面积 $ABCD$ 的比值 K 。 K 值越大,表面的耐磨性能越好(图 8)。

(4) 幅度分布 在取样长度 l 内,离中线 y 处作两条相距为 Δy 并平行于中线的线,在两平行线内轮廓线段的水平方向长度为 a, b, c, d, \dots 。 a, b, c, d, \dots 的总和 l_y 与取样长度 l 的百分比称为该轮廓线在 y 处的幅度密度。

$$\frac{l_y}{l} \times 100\% = \frac{a+b+c+d+\dots}{l} \times 100\%$$

整个轮廓线的幅度密度分布可以用幅度密度和 y 的函数曲线表示(图 9)。该函数就是统计学中的概率密度函数,其曲线称为幅度分布曲线。

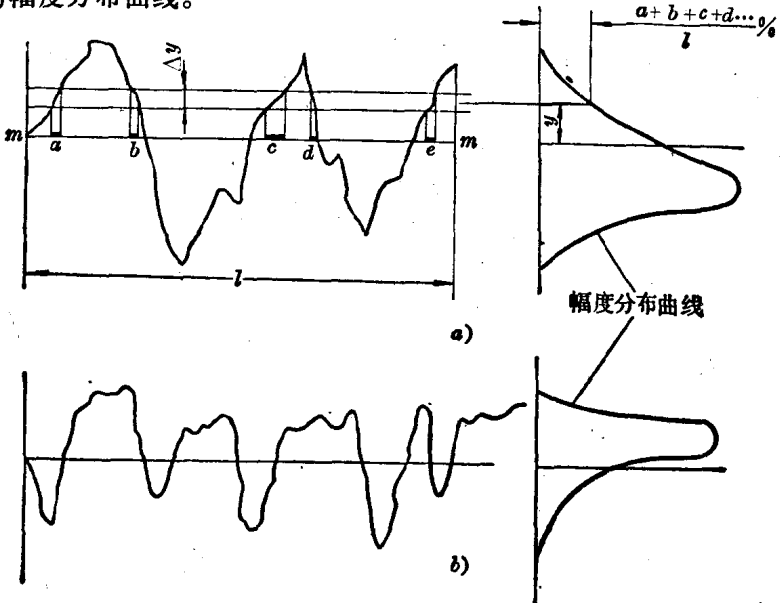


图 9 不同轮廓曲线的幅度分布曲线

如果轮廓线是不对称的,它的幅度分布曲线也是不对称的。可以用轮廓偏斜度 S_k 表征轮廓曲线和幅度分布曲线的不对称性。

$$S_k = \frac{1}{R_q^3} \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i)^3$$

丰满型轮廓线的 S_k 为负值(图9b),空虚型轮廓线的 S_k 为正值(图9a)。轮廓的幅度分布曲线和轮廓支承长度率曲线有关。用简单的绘图法可直接从幅度分布曲线绘出轮廓支承长度率曲线(图10)。因为在轮廓支承长度率曲线的某一点上,支承长度率 t_p 是幅度分布累积到该点的和,即幅度分布的积分就是轮廓支承长度率。

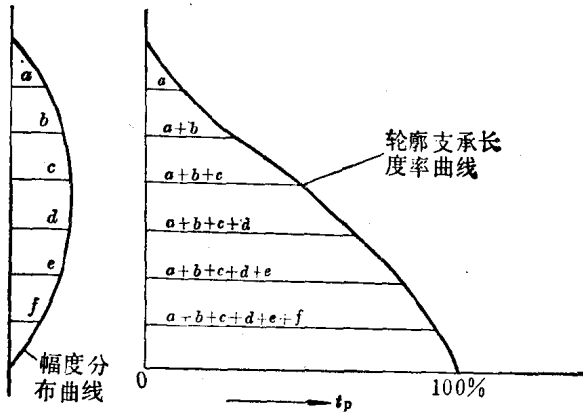
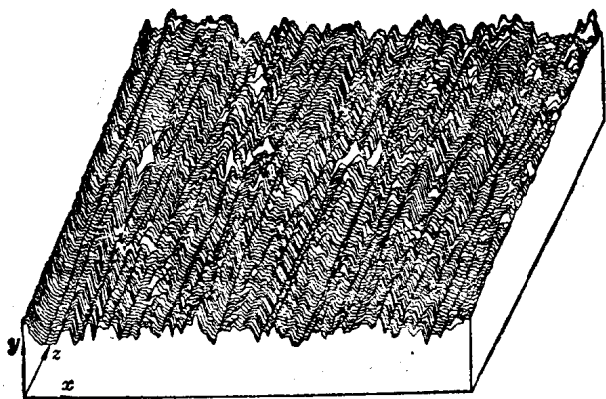


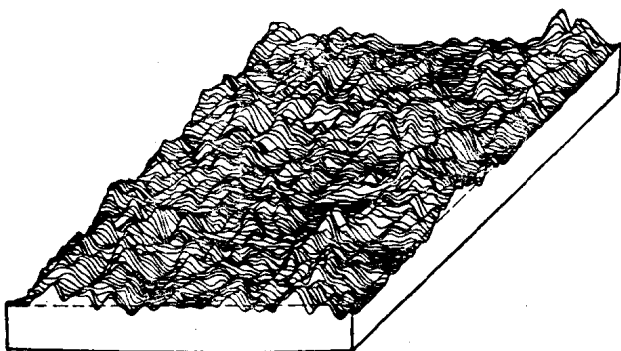
图10 幅度分布曲线与轮廓支承长度率曲线的关系

用作幅度分布曲线的方法也可作出斜率分布、峰分布、谷分布和其他统计特性的类似曲线。

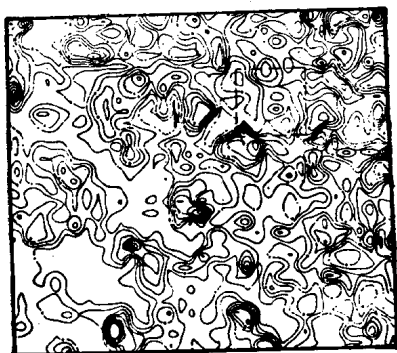
上述表征固体表面形貌的参数都只能反映被测表面某一截面上的形貌。为了反映固体表面上某一区域的全部形貌,近年来开始研究表面的三维形貌,即在 x 、 y 截面上描绘出形貌轮廓后,再使被测表面相对于轮廓仪测头在 z 轴方向移动一个微小的距离,然后再测出一条表面轮廓线,这样就可以得到由一组间隔很密的



a)



b)



c)

图 11 三维形貌图

轮廓线组成的三维形貌图(图 11a、b)。利用它可以判别形貌的纹理方向。如从图 11a 中可看出形貌有明显的纹理(一般称为各向异性的表面形貌),从图 11b 中可看出形貌无明显纹理(一般称为各向同性的表面形貌)。也可将三维形貌图经过数据处理后用计算机绘出形貌的等高线图(图 11c)。关于形貌的三维表征参数正在研究中,目前尚无统一的标准。

二、表面接触及实际接触面积

1. 摩擦表面的接触

若把两个凹凸不平的固体表面压在一起,它们之间不可能形成面接触,而只是在许多凸起的微峰间形成很多面积很小的接触点。接触点以外的区域有 100\AA 以上的间隙,表面间的原子作用力几乎不存在,可以认为在这些区域内两个表面已被完全隔开。作用在摩擦面上的载荷全部由表面间的接触点承受。表面间的实际接触面积 A ,只有名义接触面积 A_0 的千分之几至万分之几(图 12)。

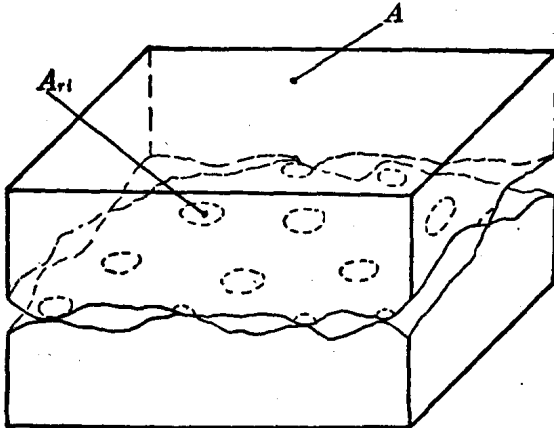


图 12 表面间的接触状态