

摩擦磨损 计算原理

ОСНОВЫ
расчетов
на трение
и износ

[苏] И. В. 克拉盖尔斯基等

机械工业出版社

摩 擦 磨 损 计 算 原 理

И. В. 克拉盖尔斯基

[苏] М. Н. 陀 贝 钦 著

В. С. 康 巴 洛 夫

汪一麟 朱安仁 范明德 译



机 械 工 业 出 版 社

本书是研究摩擦磨损的理论和计算的一部代表性著作。作者И. В. 克拉盖尔斯基在摩擦磨损方面作了长期的科研工作，在国际上享有极高声誉。

书中阐述了固体在摩擦磨损时相互接触作用的基本过程，引用了粗糙体、接触面积、预位移、边界摩擦、滚动阻力的对比资料，说明了齿轮传动、凸轮机构、密封装置、摩擦离合器~~等~~机械零件的磨损计算方法，介绍了计算摩擦磨损时所需的粗糙度参数测定方法。

本书可供机械设计人员和从事机械研究的科研工作者使用，也可供高等工业院校机械专业的教师、研究生和高年级学生参考。

ОСНОВЫ РАСЧЕТОВ НА ТРЕНИЕ И ИЗНОС

И. В. КРАГЕЛЬСКИЙ

М. Н. ДОБЫЧИН

В. С. КОМБАЛОВ

Москва «МАШИНОСТРОЕНИЕ» 1977

* * *

摩擦磨损计算原理

И. В. 克拉盖尔斯基

[苏] М. Н. 陀 贝 钦 著

В. С. 康巴洛夫

汪一麟 朱安仁 范明德 译

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可出字第117号）

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ · 印张 $16 \frac{3}{8}$ · 字数 431 千字
1982年10月重庆第一版·1982年10月重庆第一次印刷
印数 00,001—10,800 · 定价 2.00 元

*

统一书号：15033 · 5292

序 言

提高机器的可靠性和寿命是现代机器制造业的首要问题之一，其经济意义已很清楚。

如统计分析所表明，导致机器失效的主要原因，不是机器的损坏，而是动联接和机件在摩擦力作用下的磨损。工程师在设计新机器时，必定会对最重要的零件进行强度计算，然而几乎没有对任何动联接进行耐磨性校核。在设计和使用机器时，不一定会考虑具体工作条件而采用最有效的方法来减轻磨损。因此，一些工业发达的国家要花费大量的材料来修理机器。修理动联接时，要使机器停车，这样就造成了很大的损失。在许多工业部门中，每五个工人中间就有一个修理工。为了修理，需要占用很大的场地来安放金属加工机床。要想应用固体强度学的传统方法来解决摩擦磨损问题，看来是无效的。

摩擦时，相接触的动联接表层下的材料体积会发生根本的变化。这种变化又决定了磨损过程和摩擦力大小。研究摩擦时产生的综合现象及其定量特性，就是通常称为“固体在摩擦时的相互接触作用”这门较新课题的内容。

现在向读者推荐 И. Б. 克拉盖尔斯基教授及其学生 М. Н. 陀贝钦和 В. С. 康巴洛夫所著“摩擦磨损计算原理”一书。书中阐述了力学与其它学科首先是与物理和化学作有机结合而成的新内容的理论基础。书中所引用的许多理论和试验结果都是作者自己得出的。例如，现代摩擦学创始人之一 И. Б. 克拉盖尔斯基就是分子-机械摩擦理论和疲劳磨损理论的制定者。1975年，他荣膺了摩擦学金质奖章，这是在摩擦磨损科研方面的国际上最高奖赏。

在这本专著中，分析了摩擦磨损的性质，并说明了实际计算摩擦力和磨损量所用的计算式，这些计算式可把摩擦磨损过程的

外部特性和接触体的性能结合起来。此外还研究了周围介质对摩擦磨损的影响。最后提出了对接触体材料物理-机械性能的要求，这些材料决定了动联接的性态。

按这样的综合方法写成的一本书将引起设计和使用机器的工程师及研制耐磨材料和研究摩擦磨损性质的科研工作者等广大读者的兴趣。

考虑到提高机器质量这个任务的迫切性，本书的出版可以说是非常及时的。

院士 A. IO. 依施林斯基

基本符号

- A_a ——名义接触面积;
 A_c ——轮廓接触面积;
 A_r ——实际接触面积;
 b ——支承面曲线参数(无量纲);
 E ——弹性模量;
 f ——滑动摩擦系数(无量纲);
 f_a ——摩擦系数的分子分量;
 f_M ——摩擦系数的机械分量;
 a, h ——压入深度;
 $\bar{I}_h$ ——磨损率(无量纲);
 I_g ——按质量计的磨损率;
 i_n ——单位线磨损;
 i_g ——按质量计的单位磨损;
 N, P ——载荷;
 V ——体积;
 p_a ——名义压力;
 p_c ——轮廓压力;
 p_r ——实际压力;
 v ——滑动速度;
 r, R ——球体、压头和单个微凸体的半径;
 c ——取决于突部形状和材料强化的系数(无量纲);
 d ——接触斑点直径;
 T, F ——摩擦力;
 t ——时间;
 α_r ——滞后摩擦损失系数(无量纲);
 W ——摩擦功;
 β ——分子键强化系数(无量纲);
 γ ——密度;
 $\vartheta_{\text{ном}}$ ——平均表面温度;
 ϑ ——体积温度;
 σ_z ——材料的屈服极限;

HB——材料的布氏硬度；

t_p ——轮廓的相对支承长度；

e_0 ——相对变形；

ε ——以轮廓不平度最大高度的分数表示的相对接近量；

R_{max} ——轮廓不平度的最大高度；

ρ ——轮廓截面的标高；

η_p ——轮廓的支承长度；

H_B ——波纹高度；

R_B ——波纹半径；

$\Theta = \frac{1-\mu^2}{E}$ ——材料的弹性常数；

μ ——泊松比(无量纲)；

ν ——支承面曲线的幂近似参数；

λ ——导热系数；

τ ——单位摩擦力；

τ_0 ——抗剪强度；

$\Delta = \frac{R_{max}}{rb^{1/\nu}}$ ——表征表面粗糙度的无量纲综合参数；

t_e, t_n ——弹性接触和塑性接触情况下摩擦疲劳曲线的指数；

n ——引起变形体积破坏的循环次数。

目 录

序 言

基本符号

第一章 固体在摩擦时的相互作用、变化和破坏	1
摩擦过程概况	1
表面的相互作用	5
分子相互(粘附)作用	6
机械相互作用	14
摩擦时表层性能的变化	18
变化的分类	18
几何形状的变化	19
结构缺陷(空位和位错)的扩展	23
晶体结构变化和周期性结构转变	27
因生成吸附膜而发生的变化	29
化学吸附作用和氧化膜生成过程	30
存在液膜时的变化	33
抗剪强度梯度法则	35
摩擦面的破坏	39
摩擦结点破坏形式的分类	39
摩擦面破坏的特点	43
两滑动面相互接触作用过程的基本规律	48
第二章 接触面积	51
接触面积的计算(问题的来历)	51
固体表面的几何特性	59
三种接触面积	61
粗糙面模型	65
粗糙面与光滑面接触时的接触面积和接近量	68
两表面某些接触特性的计算	75
两表面在各种变形条件下的接触	77

杆状模型两个粗糙面的接触	83
轮廓接触面积的计算	87
微凸体的相互影响	96
在切向力和法向力同时作用下的接触面积	104
第三章 表征两种相互摩擦作用形式之间转化条件的临界点	109
产生临界点的各种因素	109
微凸体从弹性变形转为塑性变形	112
向微切削转化	120
发生咬死的条件	127
引起表层变化的各种因素对临界点的影响	137
第四章 预位移和静摩擦力	158
研究概述	158
两弹性球在法向力和切向力同时作用下的接触	161
粗糙体的预位移	167
弹性接触	167
塑性接触	172
机械零件	175
第五章 干摩擦和边界摩擦	178
基本定义	178
研究概述	179
分子-机械摩擦理论	197
摩擦力的分子分量	200
摩擦力的机械分量	211
摩擦力的合成和分解	217
综合摩擦系数的计算	220
真空中摩擦的某些特点	228
涂层厚度对摩擦系数的影响	230
滑动速度很大时的外摩擦	231
周围介质温度对摩擦系数的影响	233
第六章 冲击摩擦	239
研究概述	239

冲击摩擦的相互作用	240
预位移及冲量与切向冲击速度的关系	244
轮胎与不变形干燥路面的摩擦规律	250
第七章 滚动摩擦	252
某些概念和定义	252
研究概述	253
滑移是滚动阻力的一个起因	255
滚动摩擦滞后理论	260
沿粘弹性材料的滚动	264
金属相互滚动时塑性变形的作用	270
第八章 固体的磨损	272
磨损计算方法的发展	272
磨损过程的特性	275
磨粒形成机理	279
疲劳磨损理论	285
基本磨损方程	288
弹性接触情况下的磨损计算	290
摩擦疲劳	290
引起破坏的循环次数的计算	293
磨损的影响因素	300
塑性接触情况下的磨损计算	305
疲劳磨损理论计算式的试验验证	307
从热波动强度理论的观点论述磨损	308
能量磨损理论	310
磨损的预测(IBM法)	312
联接的磨损计算方法(А. С. ПРОНИКОВ 法)	316
磨粒磨损	321
侵蚀磨损	328
氧化磨损	338
第九章 磨合和平衡粗糙度	343
磨合时发生的基本过程	343
表面微观几何形状的变化	343

微观形貌形成假说	344
磨合效果的影响因素	350
平衡粗糙度的计算	359
第十章 机械零件的磨损计算	365
摩擦离合器	366
滑动轴承	371
轴的密封	382
花键联接	385
齿轮传动	387
凸轮机构元件	395
球轴承	399
第十一章 机械零件的磨粒磨损计算	404
齿轮传动	404
内燃机的汽缸套与活塞环	418
第十二章 材料摩擦性能的测定方法	422
表面微观几何特性的测定方法	422
实际接触面积的测定方法和测量仪器	425
摩擦面的物理研究方法	431
材料机械性能的测定	439
材料摩擦性能的测定	446
机器中真实摩擦副耐磨性的测定	460
附 录	464
参考文献	483

第一章 固体在摩擦时的相互作用、变化和破坏

摩擦过程概况

人们最早是根据物体沿其表面微凸体升起的现象来粗浅地解释摩擦力性质的。这时，摩擦系数的大小等于单个微凸体倾角的正切(Paraent 于1704年提出，Euler 于1748年提出)。

图1表示Belidor(1737年)所描述的固体表面。图中，将摩擦解释为球状突部从配对体的三个球状突部之间的凹穴中升起的现象。几何图形表明，这时的摩擦系数等于 $1/3$ 。任何计算都是以几何关系为基础的。在这一时期(从十七世纪末至十八世纪初)，人们还找不到其他理由来解释这一现象，因为物体是作为绝对刚体处理的。

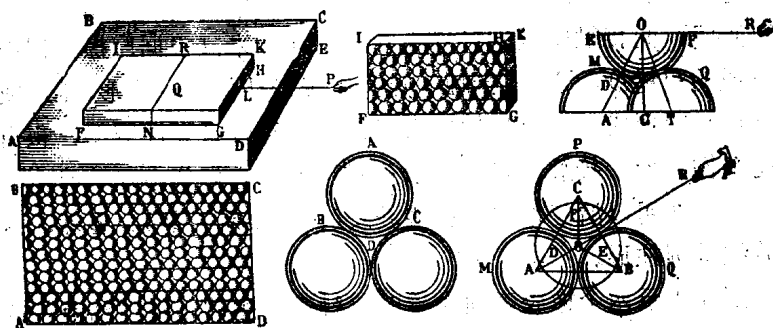


图1 Belidor 所描述的固体表面

即使在这样的图形中机械能总的储量保持不变，这种观点也是没有根据的。

英国学者 Desaguliers 于 1724 年指出，产生于固体间的分子引力能够解释摩擦现象。然而，这一富有成效的观点只有他自己确认，而其定量表达式很晚才在英国学者 William Gard (1919

年)、Tomlinson (1929年) 的著作中出现, 并在 Лерягва 的著作中作了最大的发展。

Leslie 爵士 (1804年) 在评论了斜面概念之后指出, 微凸体在其前面的接触区产生了“波纹”, 当两物体作相对滑动时, 这些波纹不断移动。

多年来, 持机械观点的学派与持分子观点的学派进行了争论。

争论于1939年告终, 当时本书作者之一在统一了这两种观点之后提出了一种理论 [188], 根据这种理论可知, 外摩擦具有二重性, 它不仅克服两表面间的分子相互作用力, 而且还要克服因表层畸变而引起的机械阻力。

Bowden 和 Tabor 于 1943 年独立地阐述了关于摩擦二重性的观点, 但是他们认为金属的机械(变形)阻力很小, 予以略去不计。他们于1975年又重新研究了聚合物的摩擦二重性问题。

任何固体表面上都有粗糙度和波度, 两个固体接触点的离散性取决于接触面的粗糙度和波度, 而考虑这种离散性是干摩擦磨损和边界摩擦*磨损分子-机械理论的基础。外摩擦发生在各个接触斑点上, 而接触斑点的尺寸为 $0.1 \sim 30$ 微米 (根据摩擦过程中所形成的粗糙度而定)。接触斑点是由于微凸体发生变形(压入或者挤压)而形成的。就其性质来讲, 变形可以是弹性变形, 也可以是塑性变形。接触斑点沿表面分布不匀, 它们集中在波峰上。

从图 2 可以清楚地看到这些波纹(白线表示断裂)。显然, 这些波纹呈圆柱形。

图 3 表示两个橡胶表面作瞬时接触后所生的粘附“结点”的破坏情形。

当两物体作相对滑移时, 原有的粘附“结点”受到破坏, 这时作用于接触斑点区的切向力使得原先的对称变形图形发生畸变。

图 4 表示模拟单个微凸体的压头与半无限弹性体相互作用的

* 两个固体之间具有固相减阻薄层时的摩擦称为干摩擦, 具有液相减阻薄层时的摩擦称为边界摩擦。

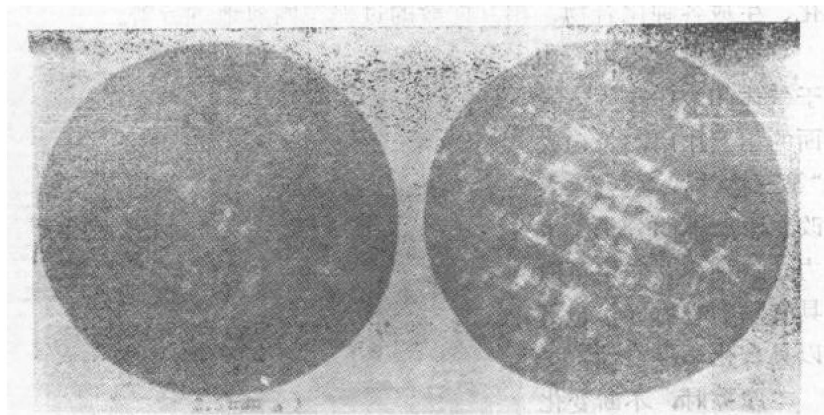


图2 接触区的轮廓面积。零件材料为45钢。表面经磨削加工, $R_{\max} = 3.1$ 微米; 波纹高度为3.8微米

a) 载荷为 $N = 40$ 公斤力 b) 载荷为 $N = 200$ 公斤力

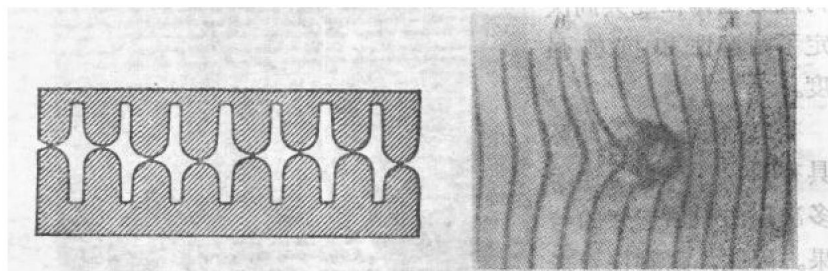


图3 两橡胶表面之间所产生的粘附(焊合)结点

图4 坚硬压头与半无限弹性体相互作用的情况下, 可见A区为压应力而B区为拉应力

结果。压头前方的材料受压, 而后方的材料受拉。当半无限弹性体材料受到多次作用后, 将周期性地产生压应力和拉应力。

图5表示刚性压头在压入锌单晶体而使之发生塑性变形后的刻划结果; 可以看出, 由于摩擦力的作用, 在划痕边缘上发生了损伤。继续增加压入深度时, 如果应力超过破坏应力, 突部将把材料切去, 被切去的材料或者堆积在突部前面或者脱落下来。

高温与产生在接触区的高压相结合, 将使表层的性能大大改变、引起很大的热应力, 并使微小体积经受“热处理”过程。氧

化、生成各种化合物、相互扩散的过程在剧烈地进行着。

在摩擦过程中，由于气体和液体与固体表面的相互作用，将构成“第三物体”，这就大大改变了摩擦的分子作用力。这种相互作用可以具有物理吸附性，也可以具有化学吸附性。

摩擦时，不断变化的表层将发生很大的变形，其性能和由原材料构成的基体性能共同决定了耐磨性和抗剪强度。

由磨损造成的破坏具有积累性，它是连续多次损伤积累起来的结果。因此，耐磨性看来对材料性能的微小变化和表面保护膜性质的变化（例如在油中加有添加剂*）非常敏感。

因为我们的任务是要建立摩擦磨损与摩擦体物理-机械特性间的关系，而这些关系将随外部条件的改变而大大改变，所以必须对外部条件定出一个范围，在该范围内这些特性可以看作固定不变。

因此，求出表征摩擦接触性能变化的临界点，从而评定耐磨

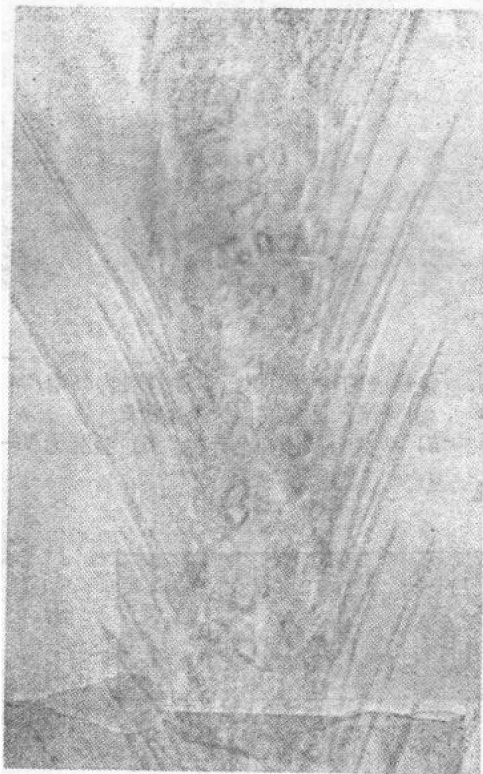


图5 刚性压头沿锌单晶体表面1120滑动时所留下的划痕。放大率为140倍（Куртеля摄）

* 正因为这样，润滑剂添加剂的生产近年来获得了飞速的发展。

性，是我们所要研究的理论中不可分割的一部份。其中有些已经作了研究，有些尚待研究。

在分析固体相互间摩擦作用时所需考虑的主要因素流程图表明了这些现象的复杂性（图6）。

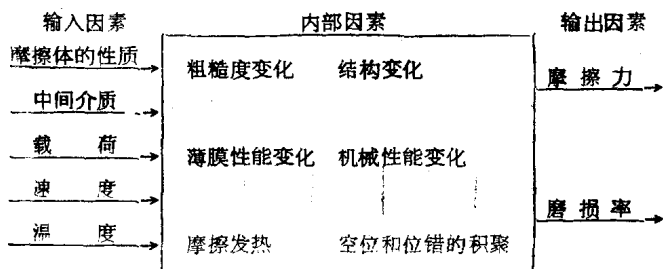


图6 影响固体相互间摩擦作用的各种因素流程图

如果我们将摩擦磨损过程分成表面的相互作用、表层在摩擦过程中的变化、表面的破坏这三个依次相继的阶段来进行研究，就可使分析简化。

表面的相互作用

研究摩擦磨损应该作为研究固体强度（更确切地说是固体表层的破坏）的新课题。如近十年来的研究（Ребиндер 及其学生的研究）所表明，鉴于固体会与周围介质相互作用从而完全改变表面性能，我们必须研究这些过程。现在这门学科还处于发展初期，我们仅仅掌握了在分析这些复杂过程时可以应用的一些通则。今后应该考虑周围介质来进一步研究固体相互间的接触作用。

当实际接触斑点上的局部压力很高时，将产生两个基本的外摩擦过程，这就是由于微凸体互嵌而形成接触点（或在磨合时压平*）和在接触点上形成“焊合结点”。即使是作用在摩擦副上的总载荷很小，这种压力也一定很大，因为这些接触斑点的总面积积

* 因为摩擦时主要产生自行复现过程，所以在磨合期微凸体被压平。

非常小。由于突部的高低不同，当载荷增大时，它们将依次发生接触。因此，实际接触面积主要随接触斑点数量的增多而增大，而不是随接触斑点尺寸的增大而增大。

接触斑点的平均尺寸究竟有多大呢？在表1中列出了根据表面微观几何特性按弹性接触公式（见第二章第75页）算得的不同机械零件经磨合后的接触斑点直径。

表1 某些零件的表面粗糙度参数和接触斑点直径（微米）

零 件	b	v	Δ	$R_{\max}$	r	在下列压力（公斤力/厘米 ² ）下的接触斑点直径	
						100	16
1A-62型车床的外离合器片	1.4	2.2	0.011	0.6	46	2.0	1.27
蒸气空气两用锤的导轨	1.0	1.2	0.2	3.6	19	1.5	0.70
“伏尔加”牌汽车的连杆轴瓦	1.2	2.0	0.024	1.15	35	5.0	3.20

上列试验数据和估算表明，对于未经磨合的表面，尤其是粗加工表面，实际压力非常大。在磨合过程中，压力随微凸体曲率半径的增大而降低，渐趋于弹性接触压力。

分子相互（粘附）作用

在固体表面上，原子和分子处于不平衡状态。其特征为表面能可以达到很大的值，对于金属约为2000~4000尔格/厘米²。这就导致固体表面与周围介质（气体、液体或固体）的原子或分子相互间迅速起反应。不用说，在固体表面上将在几分之一秒的时间内生成各种蒸气吸附膜或化学吸附膜，于是表面为液体所润湿。

在清除了氧化膜的洁净铅表面上很易出现固体冷焊现象。对于任何固体，例如两片刚剥离的云母片，也会出现这种现象。但是，它常常因接触面积小（由于粗糙不平）和被压表面的弹性而被掩盖。卸载时由于物体具有弹性，焊合结点被“拉直”而发生断裂。

当两表面连接时，在实际接触点上有很大一部份表面能散逸。例如，金属-空气界面上的表面能约为10⁸尔格/厘米²，而在