

摩擦和切削及润滑中的 电物理和电化学现象

S.N. 波斯特尼柯夫 著

章慈定 译

顾瑞龙 校

国防工业出版社

内 容 简 介

本书主要论述用电物理和电化学的观点来探讨控制和改进摩擦副和切削刀具的抗磨损性能问题。书中用量子力学观点,提出了一个与光的散射理论相似的新的摩擦理论,并提出了改善固体摩擦工作条件的努力方向。本书对润滑机理作了论述,并对润滑剂的性能作了预测和分析。

本书从实用角度讨论了刀具磨损、合金切削性能、高速钢刀具磁致伸缩强化等问题,并提出了延长刀具寿命的磁处理方法。

本书可供从事机械加工和摩擦学研究的工程技术人员和工人使用,亦可供有关专业的大专院校师生参考。

Electrophysical and Electrochemical Phenomena
in Friction, Cutting and Lubrication
S. N. Postnikov
Van Nostrand Reinhold Company 1978

*

摩擦和切削及润滑中的电物理和电化学现象

S. N. 波斯特尼柯夫 著

章慈定 译

顾瑞龙 校

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印张 9 223千字

1983年11月第一版 1983年11月第一次印刷 印数: 0,001—4,200册

统一书号: 15034·2555 定价: 1.15元

目 录

导言	1
符号表	5
第一章 关于固体接触和摩擦中电现象作用的某些	
理论概念	9
(一) 粘附力的静电分量	9
(二) 粘附力的电磁分量	13
(三) 滚动摩擦中的电粘附力作用	16
(四) 滑动摩擦中的静电分量和电磁分量	17
(五) 在外摩擦中能量逸散的共振电磁机理	23
(六) 摩擦的基本理论	25
(七) 摩擦力对滑动速度的依赖关系	30
(八) 摩擦力和能量吸收的关系	31
(九) 固体在接触相互作用中塑化的电子学机理	33
第二章 金属摩擦中电现象的实验研究	39
(一) 滑动表面物理化学活性的一个判据——功函数	39
(二) 电子发射	53
(三) 摩擦系统中电动势的主要组成部分和等效电路	66
(四) 接触导电性	75
(五) 摩擦中热电现象的特点	91
(六) 电化学过程的作用	98
(七) 具有选择性转移的摩擦中的电现象	105
第三章 边界润滑层的电学特性和承载能力	120
(一) 导言	120
(二) 由链状分子形成的边界润滑层的电学特性	126
(三) 链状分子的尺寸对液体润滑特性的影响	131
第四章 金属切削中电现象的实验研究	143

(一) 刀具-工件-机床热电回路的参数	143
(二) 热电回路状态对刀具寿命和被加工表面粗糙度的影响	152
(三) 热电动势的交流分量及其在接触过程的动力学研究中的作用	161
(四) 在电解液介质中切削的电位图的信息内容	171
第五章 切削钛合金时热电流破坏作用的理论和实验证明	182
(一) 关于热电流影响摩擦副和金属-切削刀具磨损机理的评述	182
(二) 热电流是造成金属卡死和扩散熔结的因素	196
(三) 预测刀具电绝缘效应的几个因素	204
(四) 热电现象在形成粘结接点中的作用以及在加工钛合金时的影响	214
第六章 金属-聚合物系统的摩擦起电现象	223
(一) 导言	223
(二) 摩擦起电机理的一般概念	225
(三) 在金属-聚合物摩擦副中起电对转移现象的影响	229
(四) 在切削电介质时刀具电绝缘的效应	232
第七章 切削和摩擦中的磁特性	236
(一) 刀具的磁化处理	236
(二) 用磁化刀具切削	238
(三) 用脉冲磁化处理延长钻头寿命	241
(四) 高速钢在脉冲磁场中的磁致伸缩强化	243
(五) 在恶劣的滑动条件下固体的弹磁相互作用	247
结论	252
附录 I 确定提高刀具抗磨损措施的效率判据的步骤	254
附录 II 多因子实验中响应函数的近似求法	258
参考资料	263

导 言

分子间作用力包括电子和原子核之间的静电引力或斥力，以及原子间的电动力、磁力及化合价力(交换力)。从这个意义来说，发生在例如金属 I-润滑剂-金属 II 系统中的所有现象几乎都是电现象。然而，各种相互作用力在物理和化学的本质上差别很大，目前不可能对原子(电子-离子)和分子间的各种相互作用力进行统计计算。同时，由于发展和总结了原子、分子或官能团之间键的施主-受主特性的概念以及关于在凝聚相之间的范德华(Van der Waals)相互作用力的电磁特性概念，使摩擦力的物理理论不能再停止不前了。在单独计算固体之间边界层的分子结合力和非接触粘附力时，由于固体电磁场波动之间的相互作用，结果有可能使摩擦力的二项式定律更精确，并且有可能开始进行一些实验来测量被一层边界润滑剂隔开的两块金属之间的比引力。关于凝聚相的近表面力场为电磁场这一概念，是最近发展的用于能量耗散的共振-选择机理概念的基础。这种耗散是由相互摩擦的固体的等效振子来实现的。正是这种概念(虽然对于共振损失的机理本身曾赋予过根本不同的含义)提供给作者一个发展新的摩擦理论的出发点，这个理论是在与经典的光散射理论相似的基础上形成的。第一章提出了这个理论。

固体的近表面场的实际形式取决于由晶格缺陷来表达的实际晶体结构。在摩擦中的共振晶体晶格的缺陷状态取决于界面的表面能。把金属模型看作浸在电子气中的离子晶格，就可能估算出

当来自界面两边金属的电子气同时作用在界面时的能量变化。具有低化学位的金属，其表面层的塑化表现得更明显。

表面之间的接触相互作用力的特性，直接涉及它们的能态。这就确认了从测量功函数得到的信息值，更准确地说，这就确认了从标准电极的接触电位差测量到的信息值。这类测量已经建立了功函数和边界摩擦诸参数之间的相互关系^[12]。第二章的第一部分专门说明固体表面的物理和化学变化以及为什么引起功函数变化的问题。专门分析了一种金属的电子能谱因塑性变形而畸变的情况，这就有可能根据摩擦产生的外电子发射的研究成果，作进一步的详细研究。

为了使金属摩擦（切削）的电物理和电化学现象的特点尽可能地清晰，第二章说明了电动势产生的部位和预先确定界面的电状态的某些因素。还指出了交变载荷下接触电导率曲线的滞后现象，它反映出接触副的两个元件互相粘附和相互融蚀的倾向。

宏观摩擦电现象的发展和实际意义正在变得越来越明显。为了研究这一现象，可以（像作者已指出的那样^[15]）用对应于任何一个摩擦接触状态的那些可变参数来组成非线性电路。事实上，电模型包罗各种变化情况（见第二章至第四章），而且已证明几乎是普遍适用的。同时，如何选择该电路的某一型式和计算这一电路的可能性，则取决于摩擦系统和参数的类型、特性以及该过程的趋势。例如，一个三相摩擦系统，它的简化等效电路是便于计算的，藉助于等效电路，有可能定量估算出在金属之间摩擦时实际接触面积以及润滑层的平均厚度有多大变化。有了这个估算，就有可能预测不同润滑剂的滑动接触特性，并有助于实现有利于选择性转移的条件。这种分析电路的方法还用于另一个方面：用自动统计监控总电动势来估算润滑层的承载能力^[17~20]。特别是用这种方法可解释在含有二羧酸盐类的各种液体之间的润滑特性的差别。已经证明，这些盐类的同族物的润滑能力随着分子量的增加而正比地增加。根据已得的结果知道，碳链的尺寸对于被吸附

的边界层的粘度有很大的影响。这一点也提供了一个间接的实验证明：德里亚金分解压力是取决于极性链分子长度的（见第三章）。

在加工一系列高温不锈钢合金时，刀具的电绝缘效果推动研究工作者开始全面研究发生在金属切削中的热电现象。现在我们可以用所得到的实验数据（虽然一部分数据只是相对值），来估算刀具-工件-机床热电回路的各个参数、在切削区的局部热电流（这种热电流是合金中电传导的主要类型）、合金的比热电动势等等。作者首创的刀具和工件之间电位差交流分量的振幅-频率谱的研究工作已被继承下来^[21]，第四章反映了这一发展。同时，摩擦和切削的电物理学的主要任务之一，是找出在具体滑动条件下热电现象影响固体相互作用的机理。如前所述，这个问题尚未解决，甚至连解决的第一步也谈不到。所有对于摩擦表面的热电流所起的主要破坏作用的解释，都是假设的，这些假设涉及以下几方面的问题：摩擦表面的腐蚀^[22,23]；刀具和切屑之间以及刀具和工件之间接触点氧化过程的动力学变化^[24,25]；加强粘附-粘结接合点的激励作用^[26,27]；刀具扩散破坏的加速^[28,29]等。因此，第五章简短地分析了上面提到的这些假设，并讨论根据哪些因素预先确定刀具的电绝缘效应^[30]。假如认为这些假设是合理的，则可以人为地建立实验环境，在这种环境下，断开热电流会得出预期的效果。用高速钢钻头切削钛合金的实验证明了这一点。并已证明，接触区温度的变化取决于热电回路的电阻变化。这一电阻决定彼尔梯尔（Peltier）热和焦耳损失；最后分析了这一特性影响粘附-粘结接合点的强度。

自然，在切削电介质材料时，使用绝缘夹持装置是没有意义的，因为电介质本身是绝缘体。然而正如作者及其合作者指出的那样，在加工电介质时，利用新的夹刀装置是合理的，原因显然是因为刀具与地（与接地的机床）绝缘。第六章论述了“不接地”效应，并讨论了金属-电介质副中的摩擦电现象。

第七章研究磁处理对高速钢刀具寿命的影响。作者及其合作者评述了磁致伸缩强化是最有可能使高速钢在脉冲磁场作用下改进性能的物理原因。作者研究了这一过程的机理。对某些工具钢的动态磁特性所作的比较表明，可用在磁化刀具切削时由涡流在材料里产生的热能的数量来评定材料。

这个粗略的导言的目的之一，是想使那些对这一新的科学领域只有很少一点知识的读者，不再怀疑在摩擦和切削中的电物理和电化学现象的研究所提出的前景。作者希望本导言做到了这一点。

符 号 表

a	常数、振子位置的等效周期、离子的活性、系数
A	粘附功、振幅、放射常数、摩擦力的粘附分量
b	常数、角系数
B	磁感应密度、电质量转移系数、系数
c	电动常数
C	电容量、浓度、常数、标定
d	距离、直径、间隙
D	钻头直径、随机函数的偏差
e	电动势、电子电荷
E	电场强度
$\mathcal{E}$	电动势
f	频率、单位力、激发力
F	摩擦力、法拉第(电量单位一译者)
g	电导率
G	接触电导率
h	钻削深度、工件厚度
$\hbar$	普朗克(Planck)常数
H	距离、磁场强度、边界层厚度、显微硬度
i	电流
I	电流、外激电子发射强度
j	电流密度

- k 常数、弹性系数、系数、玻耳兹曼 (Boltzmann) 常数、角系数、波矢量分量
 K 可加工性指数、效率判据
 L 氧化膜厚度、长度、电感、德拜 (Debye) 长度
 m 质量
 M 分子量
 n 浓度、位错密度、离子电荷
 N 法向载荷、寿命
 p 压力、动量、凝聚相之间的比引力、分子粘结的平均压力
 P 功率
 q 电荷
 Q 热、 Q 因素、磨损值
 r 电阻系数、电阻
 R 合力、电阻、常数、力、原子半径
 s 进给
 S 面积、频谱
 t 时间、温度、切削深度
 T 温度、周期、刀具寿命
 U 电压、势垒高度
 v 相对滑动速度、切削速度
 V 接触电位差、电位、体积、克分子体积、转移物质的体积
 W 能量、化学位、粘结力量度
 α 电导率-载荷关系指数
 Z 距离、脂肪酸分子中的碳原子数
 希腊字母符号
 α 相移、温度系数、单位电动势、西贝克 (Seebeck) 系数
 β 阻尼系数、系数
 γ 表面张力、堆垛层错能量、电导率、刀具前倾角
 δ 边界层的承载能力、吸收率判据、钝化最佳判据

- Δ 变化量
- ϵ 介电常数、应变、转移温度下的比热电动势
- η 粘度
- θ 接触角
- Θ 温度
- λ 热导率
- μ 摩擦系数、载流子的迁移率
- ν 频率
- ρ 电阻率
- σ 电荷的表面密度、表面能量、屈服点、极限强度、应变硬化
- Σ 累加（弹性和粘滞阻力的总和）
- τ 时间、剪切应力
- u 温度
- φ 功函数、电位、接触电位差、电极电位、氧化电位、相移、表面电位、无量纲势能
- χ 负电性、氧化物的电子亲和能
- ψ 金属-氧化物界面的势垒高度、波函数、里夫希茨函数
- ω 角频率

下标

- a 声学的
- c 间隙、接触、闭合回路
- e 电的、效率、电极
- f 总电动势
- g 电流的
- i 感应的
- m 磁的、金属的、最大值
- n 标称的、法向的
- o 最佳的、开路
- s 自感应

8

t	热的
τ	切向的
tr	转移
x	方向
y	方向
z	方向
0	起始值

第一章 关于固体接触和摩擦中电现象 作用的某些理论概念

(一) 粘附力的静电分量

两个凝聚相互滑动时产生的抵抗运动的阻力，将取决于两个表面之间的粘附力。从术语角度来说，在文献中定义的粘附力是不严格的，因此我们先说明一下这一术语及其它一系列术语在本书内的含意。

首先，我们讲两个物体间的粘附力，是指这两个物体接触而它们之间的界面仍是清晰的。事实上，当两个不同物体在接触点没有因扩散而发生卡死和固化的情况下，总可保持清晰的界面。

根据德里亚金及其同事们的看法，假如固体之间的吸引力(粘附力的特征)是由化学亲和力的异极力而产生的，则界面具有双电层的性质。结合键的施主-受主性质越明显，粘附力的静电分量就表现得越清楚。一种特殊情况是，当结晶固体(它们原则上可看作巨大的分子)进入接触状态时，在双电层(微电容器)中的电荷之间就形成了吸引力。

然而必须说明，在具有电子密度对称性守恒这一特征的单极结合键情况下，两个固体之间的粘附力的性质仍如前一样，是具有电特性的，但这时原子间有吸引力的原因不是库伦作用而是特殊的量子力学效应，它使电子从原子轨道迁移到能量更高的分子“轨道”上。

粘附力接合点是一个扩大的二维缺陷，此缺陷同时属于两个界面结构。假如这些结构的条件如下：它们之间的界面变得模糊不清，那么，与其说它是在两个固体之间的吸引力作用，不如说在它们之间形成了第三者。这个结合体有它自己的化学成分、结

构和性质。扩大的三维缺陷没有粘附力(adhesion)性质而有粘结力(cohesion)性质,我们将称之为粘结接合点。导致粘结接合点形成的最重要的过程是共聚物的扩散交互生长、玻璃的扩散焊接以及金属的扩散熔结(从共轭晶格间结合面消失的时刻开始),而金属的扩散熔结过程在下文中对我们特别重要。

德里亚金及其同事们采用粘附现象(adherence)和粘附力(adhesion)这两个术语,前者指两个固体之间形成了某种联接,后者表示这一过程的定量测定结果。我们可以发展他们的概念,用粘结现象(coherence)这一名称来表示粘附接触的加强,而用粘结力(cohesion)来表示这个过程的定量测定结果。如我们所知,粘结接合点的形成预先作了两点假设,一是存在粘附接触点,二是双电层有可能在加速扩散粘结过程中起了作用。很明显,从粘附接合点变为粘结接合点的过渡是不可逆的:一个新的粘附接合点的出现必然涉及系统的破坏,这发生在两个物体中的任何一个的表面上,该表面具有结合能最低这一特征。

不要企图用上面所提到的术语来绝对区分粘附现象(粘附力)和粘结现象(粘结力)。边界润滑层破裂时可认为是“纯粘结”,但只有这种边界层足够厚而固体相的横向场效应又不能贯穿时,才可以这样认为。假如在这些场的作用下,边界层分子结构的变化扩展到它的整个体积,则分子间相互粘结作用(以范德华形式、氢或化学键的形式)的机理由于纯粘附效应而变得更为复杂。说明这种效应的一个例子是金属和加在金属表面上的极性分子的活性端基团(active end groups)之间的吸附引力。

因此,在两个固体(一般都有一定的不平度)之间有润滑剂的接触情况下,出现的是粘附-粘结混合接合点,粘附和粘结过程对形成这个接合点所起作用的大小,取决于组成这一系统的各元素的物理化学特性和系统的具体情况。

现在先不讨论结合的扩散加强过程,必须强调,在摩擦作用中,化学亲和力的异极力总比纯同极力出现得多。所以,电子粘

附理论在摩擦物理学中似乎有着巨大的发展潜力，此理论揭示了在两个表面接触中的施主-受主相互作用的特殊作用，并来源于电的粘附理论。

这个理论的一个基本观点是，理论可以应用现象学的方法以统计法来描述施主-受主结合过程。一般说来，这种方法的设想是极为简单的：不需找出异极分子的波函数和在它内部的电子密度分布，只要解决一个相似的问题，即当固体在接触时电子-气体密度重新分布的问题。实际上，这就是说，把高度复杂的量子力学计算用比较简单双电层的计算来代替，这种计算可采用平行板电容器的宏观近似法。我们现在来详细地讲一下。

这样，电场的宏观平均值可作如下简化。假设电荷集中在其密度为恒定值 σ 的表面上（严格说来，它们总占据一定的体积），这个表面的厚度和到被研究电场上某一点的距离比较起来是很“薄”的。有了这一假设，我们就有可能把在两个不同类物体之间的相互作用力定义为在电容器平行板之间每单位面积的吸引力

$$f_s = 2\pi\sigma^2 \quad (1-1)$$

（为简单起见，上式未包括表示相对介电常数的某一平均值系数）。

当然，双层的实际结构要复杂得多。施主-受主反作用形成了与界面垂直的偶极子系统。这就是，在接触的两个表面上，都出现一个由相同电荷组成的不连续结构。假如这两个表面是均匀的和理想的（这条件与形成规则的镶嵌结构的电荷要求相等），德里亚金及其同事们得出以下表示比粘附力的公式：

$$f_s = e \sum_{i,k} E_s(x_i, y_k) \quad (1-2)$$

式中 x_i 和 y_k 是在某一带电极板上电荷的坐标， $E_s(x_i, y_k)$ 是在另一极板上的全部异号电荷在该点产生的电场。因为这同一个电场作用在任一坐标为 x_i, y_k 的电荷上，所以

$$f_s = \sigma E_s(x_i, y_k) \quad (1-3)$$

假如 a_1 和 a_2 是极板电荷晶格常数, z 是晶格间的距离, 则对于 $z \gg a_1 \approx a_2$, 真实电场是一个具有周期为 a_1 和 a_2 的周期函数, 并近似于均匀带电层产生的均匀电场, $\langle E \rangle = 2\pi\sigma$ 。但当 $z \ll a_1 \approx a_2$ 时, 除去最近的电荷外, 可以忽略由于对面晶格中的全部电荷产生的对某一定电荷的影响, 于是

$$f_e = \frac{\sigma e}{z^2} = \frac{ne^2}{z^2} \quad (1-4)$$

式中 n 是每单位面积的电荷对数目。

用上述假设, 对 f_e 的近似估算值过于偏低, 特别在估算电场的宏观平均值时, 尤其是这样。然而, 上述公式提供了找出支配粘附力定性规律的可能性; 这就是这个理论的价值。

对粘附力的静电分量进行理论研究后可作出如下假设: 当不同类固体接触时出现的双电层的电荷密度是可以计算的。因为以平均电荷分布为基础来定量估算粘附力, 只对 $z \approx 10 \sim 100$ 埃或稍大于这一值的情况才多少有其正确性。而这样大小的值正好是半导体近表面双电层的典型有效厚度, 所以德里亚金及其同事们选择一种半导体作为研究的主要对象。计算是在独立场方法的范围内进行的。如果假定半导体的空间-电荷密度和电荷的表面状态仅仅是静电势的函数, 则泊松-玻耳兹曼方程可简化为求积分。

例如, 设有一种半导体具有任意表面状态能谱, 当这种半导体和一种金属有表面接触, 而它们之间又被介电常数为 ϵ_s 的微观间隙 d 分隔开时, 德里亚金及其同事们得出间隙场强如下:

$$E_s = \frac{\epsilon_s kT}{\epsilon_s e L_D} \sqrt{\frac{2}{en_i} \int_0^{\tilde{\varphi}_p} \sigma(\tilde{\varphi}_p) d\tilde{\varphi}_p} + \frac{4\pi}{\epsilon_s} \sigma(\tilde{\varphi}_p) \quad (1-5)$$

式中 $\tilde{\varphi}_p = -\left(\frac{e\varphi_s}{kT}\right)$ 是无量纲电子位能 (φ_s 是表面电位);

$\sigma(\tilde{\varphi}_p)$ 是表面电荷;

n_i 是载流子的平均浓度, 表示一已知的半导体特征;

$L_D = \sqrt{\frac{4\pi e^2 n_i}{\epsilon_s kT}}$ 是德拜长度;

ϵ_s 是半导体的介电常数。

很明显，粘附力中的静电项是

$$f_e = \epsilon_s E_s^2 / 8\pi \quad (1-6)$$

德里亚金及其同事们把表面能态的模型具体化，并且在实际上把模型收缩到仅适用于两种类型的表面能级，即施主和受主，从而表明了，在金属-半导体边界可能建立起和金属-金属接触时相同数量级的电场（ 10^7 伏/厘米）。强电场的出现是具有大量表面能态的半导体的典型情况，而该强电场又确保产生强大的粘附力；这就像半导体的表面变成金属化一样。假如在与金属接触前，受主（施主）主要集中在表面，那么这种表面就是一种良好的负（正）电荷贮存器；在相反情况下，表面的性质就不是亲电的而变为疏电的了[●]。所以，为了减弱粘附力，需要用这样一种金属-半导体组合，在这种组合中，半导体的表面处于施主（受主）饱和状态，其功函数大于（小于）金属的功函数。

我们不准备详细讨论理论研究的其它结果，尤其不准备详细讨论在两个金属中间插入半导体层情况下（虽然以后我们会很容易看清，这种情况是特别有意义的），控制这种特殊粘附力特性的规律。我们也不打算在此提出说明粘附-粘结接合点本质上是电性的许多实验证明，读者可参考德里亚金及其同事们以及马姆贝托夫（Mambetov）的专题论文。我们仅指出，关于双电层在粘附现象中起着基本作用的一个最可信服的证据是由卡拉雪夫（Karashev）、克罗托娃和德里亚金早在1952年发现的，在真空中接触点破裂时发生快速电子发射这一事实。

（二）粘附力的电磁分量

现在我们来研究非接触粘附力的来源问题。这种非接触粘附力与实际接触区域内的近程力相比，是远程力；它们表征表面区上凝聚相之间的吸引力，而这种表面区域的名义接触面积 S_n 和实

● 我们把 W. R. 哈珀（Harper）提出的用于电介质的术语推广到半导体中。