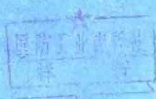


摩擦和切削 及润滑中的电物理和 电化学现象

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。本书对润滑油进行了论述,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

章燕忠 译

顾瑞光 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

译者的话

本书主要论述用电物理和电化学现象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的问题，这是现代机械工业的一个极为重要的问题。长期以来，各国科技界都是从固体间相互作用的机械模型出发，对摩擦、磨损、切削等问题进行过很多理论和实验的研究。但是目前的研究重点已开始转移到电和电磁作用的范畴内来了。学者们对摩擦、切削和润滑的机理有一系列创新的想法。本书作者是在摩擦、切削、润滑研究方面国际知名的学者。本书内容包括作者在英国剑桥大学和苏联高尔基工学院等处研究工作的成果。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，并用这个观点来解释金属摩擦中的电现象：如摩擦引起的外电子发射、电动势的主要组成部分以及摩擦系统的等效电路、接触导电性以及宏观摩擦电现象等，从而提出了改善固体摩擦工作条件的努力方向。本书对润滑机理问题也作了论述，在此基础上对润滑剂的性能作了预测和分析。本书还阐述了金属切削中的电现象，分析了刀具磨损的机理，从电物理角度讨论了延长刀具寿命的方法和刀具绝缘对减少刀具磨损所起的作用。本书还对合金的切削性能、高速钢刀具磁致伸缩强化等问题进行了探讨，并提出了延长刀具寿命的磁处理方法。书中列出了大量试验数据，其中有不少是属于各种金属、合金和聚合物的基本性能的。本书基本上反映了在这一领域内国际研究现状的先进水平，资料比较丰富。在理论研究和工业应用方面都有一定的参考价值。作者在英、美等国多次参加国际高级学者的学术交流活动，他的论述引起了国际上的广泛兴趣。我们希望这本书能对这个领域内从事研究和实践的有关科技人员及大专院校师

生的工作，有所裨益。

由于我们的水平有限，译文中一定会有许多错误，敬请读者指正。本书的有关部分经朱永昌同志审校，在此谨表谢意。

序 言

本书讨论改进摩擦副和工具的抗磨损性问题，这是现代工程的一个关键问题。从物理学的观点看，这个内容可以归结为研究具有不同化学成分和结构的固体之间的特殊相互作用，及研究在各种条件下如何控制这些相互作用的问题。

事实上，动力学过程和金属切削过程可看作是引起在三相边界系统（包括最常见的那种情况，金属Ⅰ-润滑剂-金属Ⅱ）中原子和分子相互作用的能量连续变化的原因。这时发生一种联系物理化学性质的复杂现象：热现象、吸附现象、电现象等等。赋给摩擦副并转变成其它能量形式的那部分机械能的数量，取决于在界面上粒子之间结合键的类型、在润滑剂的中间层内粒子之间结合键的类型以及受弹性应力作用的固体（金属）表面层内粒子之间结合键的类型。而摩擦和切削过程所特有的那些现象，也能影响原子之间和原子团之间的相互作用以及结合键的特性。这些现象连续地干扰系统的状态，并对重新达到平衡态所经历的过程施加影响。这种干扰最终导致宏观机械参量——摩擦力、切削功等的改变。所以，着重研究上述特殊现象，同时还研究控制影响摩擦和切削过程机理的方法，是具有明显的实用价值的。此研究的目的在于减小摩擦、磨损，减小对塑性变形的阻力，减小在形成新的表面时克服分子力所做的功等等。

还要指出，在构思新的摩擦理论时，重点并不放在固体相互作用的机械模型上，而是放在原子能级的电作用过程和电磁作用过程上。这些方面还很少有人研究过。还有一些原理得到了发展，它们对建立摩擦理论起到了促进作用。这些原理是：在吸附键中的电磁分量的作用[B. V. 德里亚金 (Deryagin), N. A. 克罗托娃

(Krotova), V. P. 斯密尔伽 (Smilga)) 以及 P. N. 列别捷夫 (Lebedev) 的原子相互作用系统的电磁辐射和吸收的杰出见解 (E. M. 里夫希茨 (Lifshitz), I. E. 齐阿洛欣斯基 (Dzyaloshinsky), L. P. 匹塔也夫斯基 (Pitaevesky))。从这些原理出发, 提出了一个三项式摩擦公式, 并有实验验证 (A. S. 阿克马托夫 (Akhmatov), G. N. 乌楚伐特金 (Uchvatkin))。此外, 还试图证实在外摩擦中能量耗散的共振电磁机理 (V. A. 波费也夫 (Bufeyev))。作者提出的基本摩擦理论, 也是以摩擦物体的相似振子 (也称为等价振子) 的强迫振动为基础的。

在过去二十年中, 曾对摩擦过程尤其是切削过程所独具的宏观现象的物理化学和工程学两方面, 进行了细致的研究。

专家们早已在很长一个时期内把注意力集中在以下事实上, 即相对滑动的金属之间和合金之间的相互作用区是一对天然热电偶的热接点。假如这种热电偶的外部回路闭合, 就会有热电流在其中流动。实际接触区内的温度可以从产生电流处的电动势的值来估算。但是, 发现了一个意料之外的情况, 热电流强烈地干扰滑动的实际过程。

1952年, P. L. 和 S. L. 高定柯 (Gordienko) 首先演示了用破坏外部热电回路的方法来减少摩擦副磨损的可能性。在金属切削领域内, 由于希望减少热电流对刀具寿命的严重影响, 在德国首次发现了一种模拟方法的应用, 这种方法是在 H. 阿克斐 (Axer) 和 H. 奥比次 (Opitz) 1953~1954年的研究中被采用的, 稍后又在于 T. H. G. 海亨坎泼 (Hehenkamp) 的工作中被采用。

1958年, V. I. 列文 (Levin) 和 I. V. 葛高列夫 (Gogolev) 介绍了装有锥度塑料刀柄的钻头 (苏联发明证书号 128261)。发明人提出, 这种新型钻头所以能改进其抗磨损性, 首先是由于塑料刀柄的阻尼、吸振作用; 同时, 这种刀柄在一定程度上起到了在刀具-工件-机床热电回路中的电路切断器的作用。

1962~1963年, M. T. 盖来 (Galey) 和 A. A. 阿伐柯夫 (Ava-

kov) 两人为了使此方法广泛应用于实际而首先进行了试验。V. A. 鲍勃洛夫斯基 (Bobrovsky) 对这一新方法在实验室条件和工厂条件下取得试验的成功作出了很大的贡献。鲍勃洛夫斯基发明 (发明证书第206972号) 的要点在于采用组合夹持装置来断开热电回路, 此热电回路的热接点是切削区。这装置看来和普通刀杆、衬套等的外观相似, 但实际由两个胶合在一起的零件组成, 采用胶合层是为了使刀具和机床绝缘。组合夹持装置制造简单, 刚性比以前用过的那些夹持部件 (例如夹布胶木衬套) 都好。根据鲍勃洛夫斯基的研究, 应用组合夹持装置可使刀具寿命延长约20%。正是断开热电回路的做法, 可以使相同条件下工作的刀具寿命提高一倍甚至更多。

其他的研究人员也进行了这一研究, 结果说明电现象对刀具寿命、表面光洁度和摩擦材料的磨损等都有重要影响。

同时, G. H. 雅库宁 (Yakunin)、M. T. 巴拉贝柯夫 (Balabekov) 及其他人, 从1965年起开始研究金属切削过程中与刀具的磁学状态有关的现象。最近, 作者和其同事们已经证实了高速钢可用磁处理的方法得到磁电强化。这是改进刀具抗磨损性的另一途径。

1967年, 在莫斯科举行了有关金属切削中的电现象问题及其实际应用的第一次会议⁽¹⁾。这次会议是由苏联科学院的机器和工艺理论科学委员会与全国机械工程研究所及机械制造工艺委员会联合发起的。会议推动了研究工作的开展, 这些研究工作的目的在于有效地应用电现象来获得有关固体相互作用这一特殊过程的详细资料, 并控制这类过程。

1969年, 根据 M. M. 克鲁晓夫 (Kruschov) 教授的倡议, 举行了第二次会议。会议报告论证了在固体产生相互作用的特殊条件下的电物理过程的重要作用。但是, 这两次会议都清楚地表明, 所研究的现象是极为复杂的, 需要进行更加深入和系统的研究。

但是,有一些试验数据与现有的定性解释是矛盾的,因而要利用这些电现象的某些建议还不成熟。例如,我们深感遗憾地指出,若在实际金属切削中采用组合夹持装置,则总会造成不必要的材料浪费。只有证明了这些夹持装置是有效的,刀具的电绝缘才有较大的经济价值。

由于摩擦物理和摩擦化学的迅速发展,研究摩擦和切削中电现象的机构和专家越来越多了。这个研究主题所涉及的问题的范围已大大地扩充,特别是自从D.N. 伽库诺夫(Garkunov)和I. V. 克拉盖尔斯基(Kragelsky)发现了选择性转移这一现象以后。这本质上是一个电化学现象,对于此现象的应用已为产生更先进的摩擦系统和更有效的润滑剂开辟了广阔的前景。

摩擦、切削和润滑中电物理和电化学的近期研究成果,发表在1973年(在奥德萨)和1975年(在塔什干)举行的全苏科学技术会议上。研究的重点为下述问题:具有磁畴结构的边界层形成的机理和性质(M. M. 斯尼特考夫斯基(Snitkovsky)、V. N. 尤里也夫(Yuriev)和其他人)、含有新塑料基材料的系统中的摩擦电现象(G. A. 齐奥尔斯基(Georgiyevsky)、L. A. 列别捷夫和其他人)、极化作用对摩擦中电化学过程动力学和对表面结构性质的影响等,还有其它一些问题。

1975年,出版了作者的著作《摩擦和切削中的电现象》。该书包括作者1963~1964年在剑桥大学(Cambridge University)卡文迪许(Cavendish)实验室和1965~1975年在日丹诺夫高尔基工学院(Zhdanov Gorky Polytechnic Institute)与高尔基城的一些工业企业合作的研究成果。作者想通过该书来反映当代对有关问题的研究现状。但是,该书并未应用与这个课题有关的全部文献,只是集中在作者感兴趣的那些问题上以及与它们有关的论题上。

本书实质上是上述著作的英文本。1976~1977年,作者到美国参加了苏联高等教育部和美国国际研究和交流部组织的高级学

者交流。作者于1976年在波士顿 (Boston) 举行的 ASME-ASLE 润滑会议上、于1977年在亚特兰大 (Atlanta) 举行的 AIME 年会上所作的报告以及在奥斯丁 (Austin) 德克萨斯大学 (The University of Texas) 摩擦磨损试验室进行研究工作期间与美国科学家们举行的那些会议上所做的报告, 阐明了前述工作的普遍意义。

S. N. 波斯特尼科夫 (Postnikov)

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，目前还不可能对原子(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^[16]）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。用高速钢钻头钻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—译者)
g	电导率
G	接触电导率
h	钻削深度、工件厚度
h	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
 x 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