

〔美〕 NAM P.SUH

固体材料的摩擦与磨损

陈贵耕 陈听梁 赵忠义 译 陈贵耕 校

固体材料的摩擦与磨损

〔美〕 NAM P. SUH

陈贵耕 陈听梁 赵忠义 译

陈贵耕 校

江苏工业学院图书馆
藏书章

国防工业出版社

(京)新登字 106 号

内 容 简 介

本书是一部专门叙述固体材料的摩擦与磨损的著作,内容包括:对固体表面的化学和物理状态的分析、界面摩擦力的产生和传输、在滑动条件下材料的力学特性、金属材料在滑动过程中的剥层磨损、聚合物和复合材料的磨损、磨粒磨损和冲蚀磨损以及化学磨损。本书的最后一章介绍如何运用摩擦学理论解决实际摩擦和磨损问题以及提高零件表面耐磨性的新方法。本书可供从事摩擦学、表面工程研究、机械设计、机械制造及设备维修的科技人员使用,并可供高等工程院校有关专业的研究生及本科生作教学参考书之用。

TRIBOPHYSICS

NAM P. SUH

PRENTICE-HALL, INC. 1986

*

固体材料的摩擦与磨损

〔美〕 NAM P. SUH

陈贵耕 陈听梁 赵忠义 译

陈贵耕 校

责任编辑 陈子玉

*

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

(邮政编码 100044)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168毫米

32开本

印张15¹/₈

397千字

1992年2月第一版

1992年2月第一次印刷

印数: 0001—2,000册

ISBN 7-118-00990-3/TH·73

定价: 15.40元

译者的话

本书系美国麻省理工学院徐楠朴 (NAM P. SUH) 教授及其同事们长期研究固体材料摩擦与磨损的专著。作者是摩擦学研究的国际知名学者。原书名为《摩擦物理学》(Tribophysics), 主要研究金属材料、复合材料和聚合物等的摩擦与磨损问题, 并介绍减少摩擦和提高零件耐磨性的新方法, 所以译者将中译本书名改为《固体材料的摩擦与磨损》。

本书从分析固体滑磨表面的化学和物理特性入手, 讨论了表面的弹塑性变形、裂纹的滋生和扩展, 阐述了摩擦的成因、材料与表面摩擦力的关系、各种磨损机理, 并运用基本理论提出了改进零件表面耐磨性的新方法。书中介绍了大量试验内容和数据, 是一本理论结合实际摩擦学专著。作者对金属滑动磨损提出了独特的剥层磨损理论, 这是作者经过多年研究得出的结果。采用聚合物和复合材料制造的机电设备的零件具有自润滑、低噪音、耐磨、耐蚀等许多优点, 所以应用范围日益扩大。但是, 随之而来的摩擦和磨损问题也迫切需要解决。本书用较多的篇幅讨论了有关聚合物和复合材料的摩擦和磨损, 以及如何提高其耐磨性等问题。作者根据实验结果, 分析了短纤维强化聚合物的磨损过程类似双相金属, 而用长纤维强化的复合材料的磨损主要由纤维的特性决定。材料的化学不稳定性对磨损有较大影响。本书详细讨论了切削刀具的磨损机理和提高其耐磨性的措施。本书还介绍了提高表面耐磨性的一些新方法, 如离子注入法、涂敷软金属层、对聚合物交联、碳化物刀具的化学、物理气相沉积以及电气设备接触点采用合金镀膜等。书中还列举了运用摩擦学理论解决摩擦与磨损实际问题的一些事例。

本书取材新颖, 参考资料和数据丰富, 可供从事表面工程研

究、摩擦学研究、设备维修、教学工作以及生产实践工作的同志参考，也可供高等工科院校有关专业的本科生和研究生作参考书用。

本书的译出将对我国摩擦学的研究和运用摩擦学理论解决实际摩擦问题起重要作用。

本书第一、二、三、四章由陈贵耕译，第五、六、七章由陈听梁译，第八、九章由赵忠义译。全书译稿由陈贵耕审校。由于时间和水平所限，译文中一定会有错误和不妥之处，敬请读者提出宝贵意见并加以指正。

译者

前 言

当某一科学技术领域中引进了新概念之后，该学科将起显著的变化。新概念可能是基本原理和现有概念的创造性发展或者是对现行的和公认的理论和方法的修正。在过去的二十多年中，摩擦学曾经历了上述两方面的变化。本书的目的是有条理地汇集并介绍引入摩擦学领域的新知识，强调其基本概念而不是包罗万象的事例罗列，重点在理论性的解释，其次是工艺技术性内容的介绍。

本书的范围是有限的，仅涉及材料的摩擦与磨损。本书不包括摩擦学的其他许多重要课题，主要原因是作者没有从事那些方面的研究，部分原因是已有其他书籍涉及这些课题。

本书许多方面的内容取材于作者在摩擦学领域中的研究成果。作者在摩擦学方面的研究是从1966年开始的，当时想用现存的理论研制较好的切削刀具。但是，那些普遍公认的理论令人失望。这导致作者想到切削刀具材料化学稳定性的重要性，最后得出本书第八章介绍的内容。从1972年开始，作者再次发现摩擦与磨损粘着理论颇不适于解决在滑动情况下的摩擦与磨损问题。这导致作者对磨损剥层理论和对摩擦生成原因进行研究。另将这些理论中的某一些应用到作者在麻省理工学院主持的工业研究项目中的非金属材料研究上面，作者进行了对复合材料和聚合物的研究。

从本书引用的大量参考文献看出，本书的许多资料是取自作者的学生的学位论文或与这些论文有关的文献。学生们为本书提供了短缺的资料并完成了全部试验工作。作者有幸能有如此多的优秀学生，他们使作者在麻省理工学院的生活感到振奋和有价值，他们是天资聪慧而又勤劳的年轻人。作者深信这些学生中有

许多人在今后的科技工作中将取得更多的成就。作者也有幸能与如此多的优秀博士后研究工作者和同事们合作完成此书。在此，作者对从前的和现在的学生和同事们为摩擦学和为本书所作出的贡献表示谢意。

在使摩擦学能建立成为一门坚实的学科之前，仍需要做大量的研究工作。如果本书对未来的摩擦学工作者在制订研究计划时能有所帮助，则本书将比预期的目的起到了更大的作用。

徐楠朴 (Nam P. Suh)

目 录

第一章 引 论

§ 1.1 摩擦学的三个方面 问题	1
§ 1.2 与摩擦有关的现象 观察和早期理论	3
§ 1.3 与磨损有关的现象 观察和早期理论	10
§ 1.4 关于表面形貌的 评述	17
§ 1.5 本书介绍	20
参考文献	20
附录1.A 由磨粒产生的摩 擦与磨损的经典 模型	21

第二章 固体表面的 物理和化学状态

§ 2.1 引言	24
§ 2.2 金属、聚合物和陶 瓷简介	24
§ 2.3 固体表面的一般特 征与摩擦学	28
§ 2.4 润滑剂与金属表面 的化学作用	32

§ 2.5 固体表面的机械 性能	34
§ 2.6 界面的热力学分 析	40
§ 2.7 结论	43
参考文献	44
附录 2.A 连续体力学基 础	46
附录 2.B 变形晶粒等效应 变量的确定	50
附录 2.C 用滑移线场法分 析塑性变形	55

第三章 界面摩擦力的产生和传输：摩擦的生成

§ 3.1 引言	62
§ 3.2 金属摩擦特性的代 表性摩擦试验和试 验观测结果	64
§ 3.3 摩擦的生成	70
§ 3.4 摩擦生成机理的分 析	73
§ 3.5 其他摩擦分量	79
§ 3.6 μ_a 、 μ_s 和 μ_p 对总摩擦 力的相对影响	81

VII

§ 3.7 结论	87
----------------	----

参考文献	88
------------	----

附录 3.A 在滑动接触下 微凸体接触点 变形的滑移线 场解	89
---	----

附录 3.B 摩擦的粘着分 量	91
--------------------------	----

附录 3.C 摩擦的犁沟分 量	93
--------------------------	----

附录 3.D 摩擦系数和磨损 率的测定	97
------------------------------	----

第四章 材料与表面摩擦力

§ 4.1 引言	99
----------------	----

§ 4.2 弹性固体对施加在 滑动接触点的交变 载荷的响应	100
---	-----

§ 4.3 表面层的塑性变 形	124
--------------------------	-----

§ 4.4 亚表面的空穴和裂 纹核生	136
-----------------------------	-----

§ 4.5 由表面摩擦力引起 的裂纹扩展	147
-------------------------------	-----

§ 4.6 结论	164
----------------	-----

参考文献	165
------------	-----

附录 4.A 断裂和疲劳	168
--------------------	-----

附录 4.B 鲍斯辛内斯克解 和赫兹应力	179
-------------------------------	-----

附录 4.C 用默温—约翰逊 法计算滑动接触 中的亚表面弹 塑性应力	184
---	-----

第五章 金属的滑动磨损

§ 5.1 引言	187
----------------	-----

§ 5.2 滑动过程中微凸体 的脱落	188
-----------------------------	-----

§ 5.3 剥层磨损理论	191
--------------------	-----

§ 5.4 在剥层磨损中微观 结构的影响	200
-------------------------------	-----

§ 5.5 结论	211
----------------	-----

参考文献	212
------------	-----

第六章 聚合物和复合材料的摩擦与磨损

§ 6.1 引言	214
----------------	-----

§ 6.2 多线型半晶体聚合 物的摩擦和磨损特 性的现象观察	218
--	-----

§ 6.3 其他聚合物摩擦特 性的现象观察	223
--------------------------------	-----

§ 6.4 聚合复合材料的 磨损	224
---------------------------	-----

§ 6.5 聚合物的摩擦基本 机理	233
----------------------------	-----

§ 6.6 纤维增强的复合材 料的磨损模型	240
--------------------------------	-----

§ 6.7 单相聚合物的磨损机理	247
§ 6.8 结论	249
参考文献	250
附录6.A 时间—温度叠加和偏移因子 $\alpha(T)$	252

第七章 由硬质点和硬质粗糙表面引起的摩擦和磨损：磨粒磨损和冲蚀磨损

§ 7.1 引言	256
§ 7.2 磨粒作用引起的摩擦和磨损	257
§ 7.3 磨粒摩擦与磨损机理	283
§ 7.4 固体粒子冲击造成的冲蚀磨损	293
§ 7.5 结论	332
参考文献	332
附录7.A 犁沟机理的滑移线场分析	335
附录7.B 极限分析定理的证明	340

第八章 由化学不稳定性引起的磨损

§ 8.1 引言	346
§ 8.2 金属切削简介	347

§ 8.3 切削刀具材料和刀具磨损的现象问题	353
§ 8.4 切削刀具的磨损机理	355
§ 8.5 溶解磨损	356
§ 8.6 受扩散控制的磨损	366
§ 8.7 结论	369
参考文献	370
附录8.A 固体热力学简介	373
附录8.B 热力学性质的估算	378
附录8.C 滑动界面处的温度分布	385

第九章 提高滑动表面摩擦学特性的新方法

§ 9.1 引言	403
§ 9.2 用生成微孔捕集磨损粒子的方法防止复合材料的磨损	405
§ 9.3 接触电阻的控制	413
§ 9.4 在硬基体上镀软镀层以降低磨损率	429
§ 9.5 在表面上镀单相材料硬镀层	440
§ 9.6 离子注入	445

第一章 引 论

§ 1.1 摩擦学的三个方面问题

摩擦学是涉及两个或两个以上作相对运动物体之间的界面的科学和技术问题的一门学科。发生在界面的相互作用的性质和结果决定材料的摩擦与磨损。在这些相互作用过程中,有力的传输,有能量耗损,有材料的物理和化学性质变化,也有物体的表面形貌改变,同时,还产生松脱的磨损粒子。所有这些似乎是随机的、复杂的表面现象,却都遵守着一定的规则并符合自然规律。弄清楚这些相互作用的性质和解决与界面现象有关的技术问题是摩擦学的基本内容,也是本书的目的。为实现此双重目标,本章和后续各章将阐述决定界面特性的基本机理,并指明基本理论在解决重要摩擦和磨损问题中的作用。

为解决摩擦学领域中的技术问题,必须弄清楚摩擦学基本的三个方面问题:

- (1) 通过物理和化学作用,环境对表面特征的影响;
- (2) 接触表面之间的力的产生和传输;
- (3) 作用在表面接触点处的外力附近表面材料的特性。

摩擦学的这三个方面问题显然是互相联系的。因此,为了能全面解决摩擦学问题,必须对这三个方面问题有所了解。但是,要弄清楚摩擦学的这三个方面问题,又必需掌握多门学科的知识。大部分研究工作者仅限于对某一方面的研究,而这样单方面的研究对某些摩擦学问题可能得不出一致的解。

为解决某一边界润滑问题,可能仅涉及摩擦学的第一、第二方面问题(即表面与环境的物理化学作用以及微凸体的相互作用)。但是,也不能忽视第三方面问题(即在外力作用下表面的宏观变

形)。因新表面、松动磨损粒子和新表面微凸体的生成会影响在界面处力的传输。相反,由于产生了实际上存在在界面上的化合物,润滑剂(以及气体环境)与润滑表面的物理化学作用会影响材料特性。这些化合物影响微凸体接触处的力的产生和传输状态,因此,影响摩擦力。

边界润滑的基本机理尚未完全认识清楚,可能是因为摩擦学的第三方面问题尚未充分地与第一、二方面问题结合起来进行研究的缘故。目前,润滑剂及其添加剂经过多次试配已经研制出来。但是,通过表面层的化学分析,对边界润滑所作的许多研究并没有得出可说明添加剂能起良好作用的原因的基本机理的任何有用结论。

为理解材料的摩擦特性,必须弄清楚摩擦学的所有三个方面问题,包括界面的物理和化学作用的具体情况、侵入磨损粒子的作用以及微凸体和表面层的变形。影响摩擦的每种作用都随滑动距离(或时间)、环境甚至滑动表面的几何形状的变化而变化。因此,摩擦系数并不是仅与材料性质有关的一个不变量。即使是同一对物体,随着具体的使用条件和滑动距离的不同而可得出不同的摩擦系数。

在正常滑动情况下,磨损主要是一定的表面摩擦力对物体作用的结果。因此,要弄清楚滑动磨损必须研究表面层的变形力学、裂纹的核生和扩展机理,以及在表面上力的传输机理。另外,在高速和重载荷作用下使界面产生较高温度的磨损,可能是由相接触材料的溶解造成的,因此,需要懂得化学热力学。

在给定的摩擦情况下,磨损是可能由多种不同的机理引起的,但是在多数情况下,通常只有一种决定磨损率的机理支配着磨损过程。因此,为处理摩擦学问题,必须在各种可能的磨损机理中判定起决定性作用的机理。一旦在规定的情况下确定了决定性的磨损过程,便可方便地找出解决问题的方法。

在处理各种摩擦学问题时,应注意表面的特性,包括物理特性和化学特性。这些特性都与本体的特性不同。表面层的化学成

分可能与本体的不同；表面的位错的活动特性与本体的不同，承受的力也不同；表面的电子结构也与本体的不同；甚至表面的原子结构也不同于本体。因此，对表面物理和化学的基本理解是促使摩擦学发展的先决条件。

§ 1.2 与摩擦有关的现象观察和早期理论

从史前时期起人类已知道作相对运动的两滑动表面之间存在摩擦的事实。人们曾利用这方面的知识而有所裨益，虽然这种应用在大部分情况下是直觉的和经验的。即使到了今天，对摩擦特性所作的许多宏观现象观察仍不失为当前工程实际应用的基础。近几十年来，为了通过科学研究对这些古代的观察结果给以合理的解释，人们已进行了大量的科研工作。因此，把讨论摩擦现象问题作为引论的一部分是最为合适的。

摩擦特性受下列诸因素的影响：

(1) 相接触表面的运动学（即相接触表面之间的相对运动的方向和大小）；

(2) 外加载荷和（或）位移；

(3) 环境条件，如温度和润滑剂；

(4) 表面形貌；

(5) 材料性质。

这些支配摩擦的重要因素清楚地说明了摩擦系数（即切向力与法向载荷之比）并不是一种单纯的材料特性。

在正常的滑动条件下，大部分金属材料的摩擦系数大体上与法向载荷和滑动速度无关。但是，当法向载荷增加到很大时，例如在金属切削中出现的情况，则摩擦系数常常随法向载荷和滑动速度的增大而减小。在中等法向载荷和速度范围内，摩擦系数可达到某一峰值，如图1-1所示。图中 ΔT 是界面温度增值。

聚合材料（塑料）的摩擦系数的变化情况与金属的不同。它与法向载荷和滑动速度有关。由于大部分聚合物是热塑性和热固

性材料，因此它的摩擦系数即使在较低的滑动速度下仍呈现较低值，如图1-2所示。当滑动速度增大时，摩擦系数首先增大，然后，在滑动速度很高时，随滑动速度增大而摩擦系数减小，如图1-3所示。

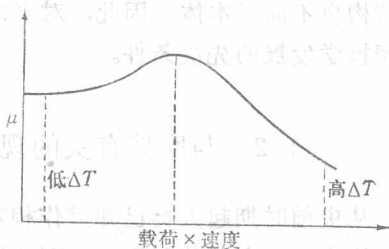


图1-1 金属的摩擦系数与载荷乘速度的乘积之间的定性关系曲线

过去对各种材料的摩擦特性的实验结果都是用粘着模型进行解释的。这种理论的实质是假定表面由微凸体组成以及界面是由微凸体接触点构成，如图1-4所示。除

金属切削外，真实接触面积远小于名义接触面积。金属切削时，真实接触面积接近名义接触面积。

根据摩擦的粘着理论，在切向力作用下界面作相对运动时，每对相接触的微凸体焊连在一起并为适应相对运动而剪切。非常粗略的摩擦力近似值可由下式得出

$$F = A_r \tau \quad (1-1)$$

式中 τ 是每一结点的材料剪切强度，为满足滑动的运动学关系，外加切向力必须超过此剪切强度值； A_r 是真实接触面积。H 是材料硬度。根据真实接触面积必须足以支承给定的法向载荷 L 的假设， A_r 可用下式表示，即

$$A_r = \frac{L}{H} \quad (1-2)$$

自从引入粘着摩擦理论以来，关于 τ 是怎样与 H 有关的问题已进行了大量的讨论。许多深信粘着理论的学者们认为由于滑动过程中表面层的加工硬化，所以假定 τ 必定大于本体材料的临界剪切强度。这种假定是必要的，因为摩擦系数的计算值要比试验得出的值小。若假定 τ 等于本体材料的临界剪切强度 k ，则

$$F = A_r \tau = \frac{L}{H} \tau = \frac{L}{6k} k = \frac{L}{6} \quad (1-3)$$

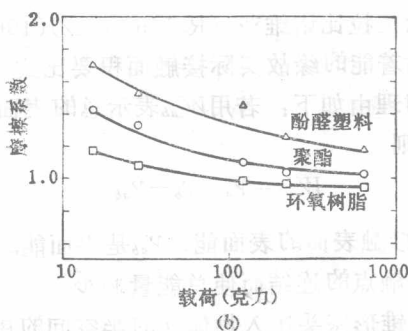
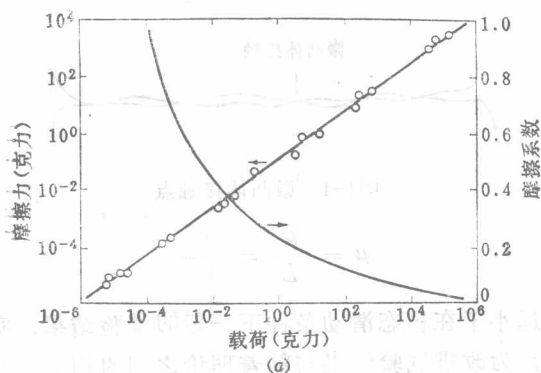


图1-2 热塑性和热固性塑料的摩擦系数
(a) 摘自参考文献[2]; (b) 摘自参考文献[11]。

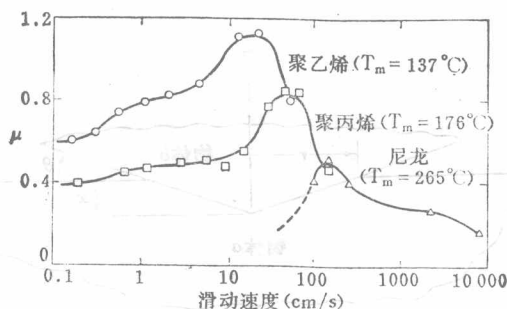


图1-3 热塑性塑料的摩擦系数与滑动速度关系^[10]

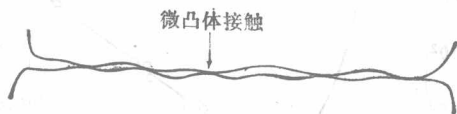


图1-4 微凸体接触点

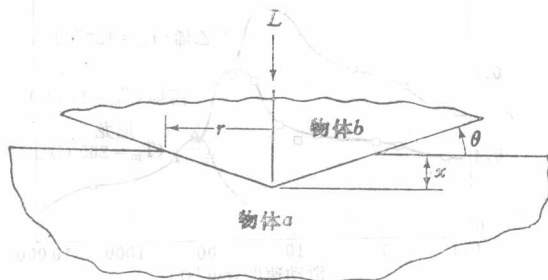
$$\mu = \frac{F}{L} = \frac{1}{6}$$

此计算值远小于在稳态滑动条件下一般的试验结果, 实验数据为0.3到0.7。为改进试验结果与粘着理论之间的相关关系, 已出现了许多理论。

有一种理论是拉比诺维茨 (Rabinowicz)(1965) 提出的。他认为由于表面粘着能的缘故实际接触面积要比式 (1-2) 给出的值大得多。他的理由如下: 若用 W_{ab} 表示总的表面能变化量 (即表面粘着能), 则

$$W_{ab} = \gamma_a + \gamma_b - \gamma_{ab} \quad (1-4)$$

式中 γ_a 和 γ_b 是两接触表面的表面能, γ_{ab} 是界面能。 W_{ab} 总是正值, 即由于微凸体接触点的连结而使总能量减少。若将微凸体的压痕理想化为材料 b 锥形压头压入物体 a 的半空间的压痕, 如图 1-5 所示, 则在无限小压入量 dx 过程中, 法向载荷 L 所作的功可等于材料塑性变形所作之功与表面能变化量之差, 即

图1-5 代表微凸体压痕的锥形压头的压痕^[12]