

微 纳 米 生 物 摩 擦 学

——大自然的选择

(德) 馥 谢尔格 (乌) 杂 戎尔博 著

李健 杨膺 顾卡丽 董光能 等译



机 械 工 业 出 版 社

原 著 序

从生命起源到现在，在整个进化过程中，人们总是要求大自然在解决技术问题时充当工程师的角色。有机物已经演绎出各种各样定义明确的形状和结构。虽然它们经常是复杂和脆弱的，但仍然能应付极端的机械载荷。一些有机物依附于基体而生存，有些还可以移动、飞行、游泳和潜水。所有能力以及更多的功能都是建立在各种各样巧妙结构基础上的。科学的主要兴趣是认识这些，因为它可让人们洞察自然在生命演变过程中的作用。除此之外，我们能发现进化后的物质的具体化学和物理性质，可以学习它们作为结构元素的使用和它们的生物作用和功能。这种知识对于人类的工程应用也是密切相关的。

当今工程科学面临着很多巨大的挑战中就包含了“微型化”的问题，昆虫和其他小生物在他们的演变期间解决了许多同样问题。动物学家和形态学者针对这些有生命的微机械系统的结构已经收集了浩瀚的信息。我们现在已经远远不只是能对它们进行纯粹的描述，而是到达了非常详细深入了解的地步。今天，在物理和化学的进步使得我们能在微牛顿和纳牛顿尺度下测量生物结构的粘附力、摩擦、应力和磨损。此外，天然粘结剂和润滑剂的化学成分和性能非常容易进行化学分析。不仅如此，计算机辅助的重构技术可能在工程师的车间里仿造出生物机械系统。

由 ~~詹姆斯·H·赫普~~ 和 ~~詹姆斯·H·赫普~~ 所著的这本书是涉及具有摩擦表面或以粘性分泌物粘着身体各部位，或粘附有机体到基体上的生物机械系统的专著。这样的系统曾经迷住了显微镜学家几个世纪，但直到最近通过应用新颖的方法才使我们对这种系统的功能有了点真正的了解。这本书是活跃的跨学科科学一个优秀例证，它表明物理学、工程学、摩擦学、结构生物学和材料学是如何的接近。内容没有仅限制在适应于粘附的各

种各样的天然生物结构上，为了说明形态学、摩擦系统超微结构和生物力学的不同的原理，本书还给出几个实验例子，并且概述了生物结构设计、性能以及功能之间相互联系的一般规律。这些介绍是建立在 ~~杂~~ ~~书~~ ~~中~~ ~~对~~ ~~微~~ ~~观~~ ~~摩~~ ~~擦~~ ~~学~~ ~~原~~ ~~理~~ ~~的~~ ~~长~~ ~~期~~ ~~研~~ ~~究~~ ~~积~~ ~~累~~ ~~和~~ ~~对~~ ~~昆~~ ~~虫~~ ~~粘~~ ~~附~~ ~~装~~ ~~置~~ ~~的~~ ~~超~~ ~~结~~ ~~构~~ ~~和~~ ~~实~~ ~~验~~ ~~性~~ ~~研~~ ~~究~~ ~~的~~ ~~基~~ ~~础~~ ~~上~~ ~~的~~。本书对生物微米摩擦学的原则进行了基本的阐述。由于将关于超微结构、材料性能、生物摩擦系统的粘附 ~~原~~ ~~理~~ ~~解~~ ~~粘~~ ~~附~~ ~~的~~ ~~知~~ ~~识~~ ~~聚~~ ~~集~~ ~~到~~ ~~一~~ ~~起~~，使这本书成为从事生物系统工作的工程师和物理学家以及开始研究摩擦和粘着的生物学家的一个最好的起点。这里所介绍知识在高技术区域的用途也是不容置疑的，譬如微机械和合成材料科学。

马克 ~~普~~ ~~朗~~ ~~克~~ 近代生物研究所所长

~~哉~~ ~~杂~~ ~~书~~ ~~增~~ ~~刊~~ 教授

~~国~~ ~~国~~ ~~年~~ 月

中文版序

20世纪 60年代提出的生物摩擦学（~~月原研~~）是摩擦学、生物医学和材料科学等的交叉学科。初期的研究对象是以人体内存在的各种摩擦，如关节的摩擦；管腔（血管、气管、消化道、排泄道）内的摩擦；运动产生的肌内、肌腱间的摩擦等可以引起人体许多生理变化和疾病。其研究目标是开发摩擦磨损低、病理反应小的人工器官，主要集中在人工关节和心脏瓣膜的研究。

随着研究的广泛深入的发展，以及仿生技术的兴起，生物摩擦学的研究范畴扩展到几乎包涵整个生物界，而研究的目的不仅在于揭示生物体优异的结构和功能的科学技术奥秘，同时也试图从仿生的角度，借鉴这些奥秘将其应用到人工器件上，以提高其性能。迄今，这方面的研究已经取得许多成果。

武汉材料保护研究所李健教授等将德国学者 ~~杂~~和乌克兰学者 ~~所~~所著的《微纳米生物摩擦学》译成中文出版，标志着生物摩擦学的研究向着更深层次的微观尺度上的发展，向人们展示出别开生面的领域。

本书的特点以生物体的摩擦及其相关的润滑为中心，基于生物体材料的流变性质，阐述了摩擦行为及其与结构、材料等生物学特征之间的相关关系。同时，作者在阐述生物摩擦系统之前，介绍了常规微观摩擦学的基本原理和知识，有利于读者与宏观摩擦的对照，更能突出理解生物摩擦的特征。

本书以相当的篇幅介绍相关的试验设备和研究实例，从事研究的读者可以从中得到有效的直接帮助，这对于促进本领域实验研究工作的发展具有重要意义。

通常认为，纳米科学技术是面向 21世纪的新科技。由此兴起的微

机电系统（~~机械系统~~）得到迅猛发展。实践表明，当前在微机电系统研究中，微摩擦以及表面粘附现象已成为影响进一步发展的关键问题。因此，本书的出版对于微观摩擦学、仿生技术以及微机器人和微机电系统等的研究具有重要的参考价值。

清华大学摩擦学国家重点实验室教授

中国科学院院士

温诗铸

二〇〇八年 愿月 愿日

原著前言

这本书意欲为想要熟悉生物的微纳米摩擦学这个新的跨学科研究领域的科学家和工程师提供物理、化学、机械和生物学科综合性的方法和知识。生物微纳米摩擦学的目标是收集生物系统的摩擦、粘附和磨损的信息，并应用这些新知识于微机械电子系统的设计、单分子层润滑剂的开发、新胶粘剂的开发、以及人造关节的设计。

本书划分成五个主要部分，第一部分介绍基础知识和物理原理，第二部分论述生物摩擦系统，第三部分介绍关键的测试仪器设备，第四部分是专题研究，最后一部分是附录。

第一部分涉及到微摩擦和粘附力理论和测量、接触模型适用性和用法，以及润滑这几个基本的问题。特别着重介绍了液体薄膜的作用和他们对粘附和摩擦的影响。对水膜进行了详细的研究，因为这是最常见的吸附膜。使用硅球在一个平的硅样品上滑动来解释摩擦学性能。这个系统被用作模型和参照系，为解释从生物测试获得的数据提供一个平台。

第二部分直接介绍生物的摩擦和粘附现象的研究，讨论了基本问题，对生物的摩擦和粘附系统进行了综述。从生物的宏观摩擦学的研究（人的关节，等）出发，对生物微观摩擦学的领域进行了定义。当在书中出现生物学的概念时，会进行解释。读者也能利用在书后面的词汇表获得更多信息。

第三部分介绍了测试技术和设备。结合最近在测量和特性描述方面的飞速发展，对新颖的测试器材进行了详细的描述。介绍了包括激光干涉仪和基于光纤的微摩擦和粘附力测试器和扫描探针显微镜（~~杂云~~）在内的一些现代化仪器。这部分也注意到生物制备技术以便利用有限的样品获得最多的数据。另外，对相关的技术分析方法如：显微镜（~~杂云~~，~~栽云~~），化学分析（例如光电子能谱）以及薄膜特性描述也进行了讨论。

在书的第四部分对大的绿色灌木蟋蟀（~~栽云~~）进行

译者前言

本书是德国学者 ~~杂~~和乌克兰学者 ~~所~~所著，作为 ~~杂~~出版社的“纳米科学和技术系列丛书”出版的。书中介绍了作者在微 ~~纳~~米技术和生物摩擦学的研究成果，并对该领域相关进展进行了总结和分析，开辟了在微 ~~纳~~米尺度研究生物摩擦的新领域，对摩擦学、仿生学、微机电技术研究，有积极的参考价值。

本书在翻译过程中得到与作者直接交流的机会，并在图片资料方面得到作者的大力支持，为正确翻译原著，表现原著风格创造了条件。书中有少数拉丁语动物名词，没有合适的中文译名，经与作者协商，保留原文的拉丁语名。

全书由李健、杨膺、顾卡丽、董光能翻译并校对。参加翻译工作的还有郭志光（第 ~~员~~章，第 ~~圆~~章）、刘建芳（第 ~~猿~~章）、于大国（第 ~~源~~章，第 ~~愿~~章，第 ~~员~~章）、刘秧生（第 ~~缘~~章，第 ~~远~~章）、刘洪涛（第 ~~苑~~章），左玉萍（词汇表）。

由于本书涉及内容的学科跨度大，并处于发展过程中，加之译校者的水平有限，书中难免有不成熟和错误之处，望读者指正。

李 健

~~国~~源年 源月

目 录

原著序
中文版序
原著前言
译者前言

第一部分 基础与物理工具

员 引言	猿
圆 微米摩擦学的物理原理	远
圆 基本定义	远
圆 模型材料	愿
圆 力学性能	怨
圆 粗糙度	怨
圆 弹性体	员
圆 粘弹性体	员
圆 接触力学	猿
圆 粘着	苑
圆 分子力	圆
圆 静电力	圆
圆 毛细作用力	圆
圆 润滑	苑
圆 简单液体试验	愿
圆 简单液体仿真	猿
圆 水的整体性能	猿
圆 水的分子膜特性	猿
圆 润滑和水膜厚度	猿
圆 固体润滑	源

圆近	摩擦	源
圆近圆	宏观粘 辮	源
圆近圆圆	微观粘 辮	源
圆近圆圆	纳米粘 辮	源
圆近圆原	粘 辮与滑动速度	源
圆近圆缘	摩擦与滑动速度	缘
圆近圆近	摩擦与温度、湿度	缘
圆近圆苑	摩擦与接触几何	缘
圆近圆愿	法向力的函数关系	缘
圆近圆怨	振动	缘
圆苑	磨损	远
圆苑圆	微观范围的磨损	远
圆苑圆圆	纳米范围的磨损	远
圆苑圆圆	有机单分子层的磨损	远

第二部分 生物摩擦系统

猿	生物的摩擦和粘附系统	远
猿圆	生物粘附	远
猿圆	减少摩擦的系统	远
猿圆圆	流体和摩擦	远
猿圆圆圆	关节和关节软骨	苑
猿圆圆圆	肌结缔组织	苑
猿圆圆	增加摩擦的系统	苑
猿圆圆圆	植物表面复制机制	苑
猿圆圆圆	硬骨鱼类的卵丝	愿
猿圆圆圆	山涧鱼的粘附结构	愿
猿圆圆原	鱼棘中的摩擦	愿
猿圆圆缘	蜥蜴垫的移动粘附	愿
猿圆圆近	灵长类动物表皮	愿
猿圆圆苑	蛇鳞摩擦表面	愿
猿圆圆愿	寄生虫及植物孢子的互锁	缘
猿圆圆怨	鸟羽毛的互锁装置	缘
猿圆	粘附介质	愿
猿圆圆	粘剂的高分子设计	愿

猿缘	偶联剂	愿
猿缘	粘附增加系统	愿
猿缘	细胞粘附	愿
猿缘	无脊椎动物	愿
猿缘	软体动物足丝粘附	愿
猿缘	海星管脚	愿
猿缘	软体无脊椎动物的动态粘附	愿
猿缘	藤壶的粘附	愿
猿缘	昆虫和蜘蛛的持久粘附	愿
猿缘	水蚤甲壳类动物的临时粘附	愿
猿缘	鱼类和海鞘类脊索动物的幼虫粘附	愿
猿缘	树蛙粘附	愿
猿缘	蝙蝠粘附	猿
猿缘	植物	猿
猿缘	牙齿表面的粘附	猿
猿缘	抗粘附机制	猿
猿缘	植物	猿
猿缘	动物	猿
源	昆虫的摩擦装置	猿
源	昆虫附着装置的原理	猿
源	昆虫表皮——材料的超微结构	猿
源	具有两互补表面的系统	猿
源	蜻蜓头部制动系统	猿
源	翼锁装置	猿
源	昆虫的掣爪肌器官	猿
源	草蜻蛉的基节互锁机构	猿
源	跳蝉的基节互锁机构	猿
源	一种适应性强的表面系统	猿
源	表面特征	猿
源	爪垫材料的超微结构	猿
源	附着爪垫的其他两种样式	猿
源	外表皮的分泌物	猿

第三部分 试验设备

缘 微观测试设备	员苑
缘员 微摩擦试验仪	员苑
缘员员 力的测试	员苑
缘员圆 微牛顿级的弹力	员愿
缘员猿 球的选择	员怨
缘员源 基于干涉计的摩擦试验仪	员怨
缘员缘 基于光纤光学系统的微摩擦试验仪	员员
缘员远 生物微摩擦试验仪	员猿
缘员苑 数据分析	员源
缘圆 微观力学性能分析	员远
缘圆员 硬度测量	员远
缘圆圆 划痕测试	员苑
缘圆猿 接触角测量	员愿
缘圆源 轮廓仪	员怨
缘圆缘 润滑油分析	员园
缘猿 相关的表面科学技术	员员
缘猿员 光电子能谱	员员
缘猿圆 俄歇电子能谱	员猿
缘猿猿 红外光谱	员源
缘猿源 低能量电子衍射	员缘
远 纳米探针技术	员愿
远员 扫描隧道显微镜	员愿
远员员 工作原理	员愿
远员圆 恒电流方式 轳高方式	员园
远员猿 隧道谱	员园
远员源 水合扫描隧道显微镜	员员
远圆 轳	员园
远圆员 工作原理	员园
远圆圆 接触模式	员猿
远圆猿 轻敲模式	员源
远圆源 非接触模式	员缘
远圆缘 力的调制	员缘

远源	选择结果	员远
远源员	探针与分子间的力	员远
远源圆	纳米级摩擦磨损	员苑
远源猿	纳米压痕测试	员愿
苑	显微镜技术	员园
苑员	显微镜技术原理	员员
苑员员	光学显微镜	员员
苑员圆	相衬显微镜	员圆
苑员猿	干涉显微镜	员圆
苑员源	偏振光显微镜	员猿
苑员缘	荧光显微镜	员源
苑员远	透射电镜	员源
苑员苑	扫描电镜	员源
苑圆	试样准备过程	员远
苑圆员	固定	员远
苑圆圆	包埋	员愿
苑圆猿	切片	员愿
苑圆源	组织着色	员怨
苑圆缘	组织化学	员园
苑圆远	透射电镜的对比度技术	员园
苑圆苑	临界点干燥	员员
苑圆愿	冷冻干燥	员圆
苑圆怨	低温切断与冷冻切断	员圆
苑圆员园	冷冻置换法	员猿
苑猿	用于表面表征的显微镜方法	员源
苑源	研究材料结构的专用技术	员远
苑源员	微观突起的超结构	员远
苑源圆	孔道	员园
苑源猿	接触区的液体	员园
苑源源	纤维复合物的材料特性	员园

第四部分 实例研究

愿	试样、试样制备和试验装置	员苑
愿员	一种生物微系统	员愿

愿园 试样老化	页园
怨 实例研究 I : 压痕和粘着	页园
怨园 测试过程	页园
怨园 压痕	页猿
怨猿 附着	页苑
怨猿怨 附着过程	页苑
怨猿怨 分离过程	页怨
怨猿怨 分泌物的粘着特性	页怨
员园 实例研究 II : 摩擦	页猿
员园怨 试验装置	页猿
员园怨 试验结果	页源
员园怨怨 负荷决定性和摩擦滞后	页缘
员园怨怨 摩擦的各向异性与内部结构	页苑
员员 实例研究 III : 材料性能	页怨
员员怨 弹性	页怨
员员怨 粘弹性	页园
员圆 展望	页猿
附录	
附录 粤 接触模型	页缘
附录 月 毛细作用理论	页苑
附录 悦 词汇表	页怨
附录 阅 符号表	页怨
参考文献	页园

第一部分

基础与物理工具

员 引言

微米摩擦学被认为是关于运动体之间的机械相互作用，在微米到纳米尺寸范围、毫牛顿（毫）到纳牛顿（纳）力范围内研究摩擦、粘着、润滑和磨损的科学。这个微米科学的新兴领域的发展得益于新型分析技术的不断发展，从而可以洞察一些基本的过程，例如，原子力显微镜（原子）。在微观范围，数据存储工业运用摩擦学来解决磁盘驱动器的磁头与磁盘界面的问题。由于机器零件的微型化，它们之间的相互作用力也急剧下降，如公司的“千足虫”——原子力显微镜的基本存储设备，其作用力已经达到了纳牛顿范围^[1]。越来越多的传统机械设备，如电动机，正在被微型化^[2]。原先使用的一些中等尺寸的部件，像汽车加速度计，正在被硅基机械微系统取代（见文献 [3] 中的概述）。

生物学的昆虫微系统和工程微系统在很多方面是相同的。首先，它们的力学相互作用是发生在相同的长度和应力范围^[4]。在这两种系统中，其表面性质，如润湿性、微观结构或者表面化学等方面的性质都会强烈影响整个系统的性能。有少数生物学的设计样本已经在工程系统中被利用。如图 1 所示，这个工程微系统采取了基于蚯蚓移动的摩擦方式，内在的微驱动使得这只“工程昆虫”能



图 1 或许这是世界上最小的人造蚯蚓，长约 100 微米，直径 10 微米，它周期性地伸缩，依靠摩擦来移动。可用于动脉内的研究