

内燃机磨合过程的 量化评定

关德林 李国宾 王宏志 魏海军 著

NEIRANJI MEHE GUOCHENG DE LIANGHUA PINGDING

大连海事大学出版社

内燃机磨合过程的量化评定

关德林 李国宾 著
王宏志 魏海军

大连海事大学出版社

© 关德林, 李国宾等 2009

图书在版编目 (CIP) 数据

内燃机磨合过程的量化评定 / 关德林等著 .—大连: 大连海事大学出版社,
2009.4

ISBN 978-7-5632-2282-7

I. 内... II. 关... III. 内燃机—磨合—量化—评价 IV. TK4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 053576 号

大连海事大学出版社出版

地址: 大连市凌海路 1 号 邮编: 116026 电话: 0411-84728394 传真: 0411-84727996

<http://www.dmupress.com>

E-mail: cbs@dmupresss.com

大连华伟印刷有限公司印装

大连海事大学出版社发行

2009 年 4 月第 1 版

2009 年 4 月第 1 次印刷

幅面尺寸: 140 mm×203 mm 印张: 7.125

字数: 190 千

印数: 1~500 册

责任编辑: 姜建军

版式设计: 晓 江

封面设计: 王 艳

责任校对: 沈荣欣

ISBN 978-7-5632-2282-7 定价: 15.00 元

前 言

台架磨合是内燃机生产制造过程的重要环节之一，磨合质量的优劣直接关系到内燃机的运行状态及使用寿命。迄今为止，相关的研究各自局限于磨合机理、磨合表面和润滑油磨粒识别几个方面，尚不足以系统准确地揭示磨合规律。磨合过程的监测乃至磨合质量的评定尚缺乏有效的方法。

评价内燃机磨合质量的直接判据是摩擦副磨合后的表面状态，主要包括表面形貌、表面粗糙度、表面磨损量等静态信息。这些信息只能通过停机后拆卸检验才能获得，还无法实现动态连续监测。

毋庸置疑，在磨合过程中，内燃机润滑油中的磨粒和振动信号蕴藏着丰富的反映磨合系统状态和特征的信息，可用于描述摩擦副表面物理化学变化过程。特别值得提出的是，磨粒和振动信号易于采集和获取，是实现内燃机离线或在线状态监测的有效手段。因此，对磨合进行中的内燃机，实时采集磨粒和振动信号，建立基于磨粒和振动信号的磨合表面评估模型，可实现在不停车、不拆卸条件下，内燃机磨合过程的连续监测和评定。实现这一目标的关键是提取磨合表面、磨粒和振动信号的特征参数，以全面、系统、准确地进行磨合过程量化评定。

表面的评定参数很多，主要有二维（2D）参数、三维（3D）参数和 MOTIF 参数等。表面形貌二维评定参数应用于科学研究和工程实际已近半个世纪，但是，由于它们局限在二维轮廓截面上，尚不能完

整描述真实表面的三维形貌，而且二维评定参数过多，实际应用很不方便。近年来表面形貌三维评定参数的研究成为热点，将小波、分形等数学方法应用于表面形貌的研究中，先后出现了分形维数、特征粗糙度等用于表面形貌的表征。然而，已有的研究多限于表面粗糙度特征的研究，对磨合表面的研究较少。本书在系统研究磨合表面形貌评定方法的基础上，从磨合表面的纹理和色彩信息出发，综合运用小波分析、奇异值分解和信息熵理论，提取磨合表面形貌三维特征参数。

磨粒特征提取是磨粒识别技术的关键。在传统的研究中，人们基于欧氏几何原理，利用计算机图像处理技术对单个磨粒进行二维特征的定量分析和识别，提出了 200 多个特征参数。然而，不同种类的磨粒参数可能含有相同或者类似的特征信息，即存在信息冗余度。磨粒特征参数信息冗余不但会降低磨粒特征信息的描述与磨粒识别的效率，而且对于磨粒的某一种形态特征，应用不同的磨粒参数来描述可能有不同结果，甚至可能相互矛盾，从而降低磨粒识别的准确性。况且，利用二维特征参数尚不能准确识别疲劳剥块磨粒、滑动磨粒、层状磨粒等。近年来，人们在用小波、分形几何理论表征磨粒形态方面进行了大量有益的工作，取得了一定进展。而对于磨粒的三维特征提取还处于表面参数研究阶段，尚没有形成全面表征磨粒三维形貌特征的理论与方法。因此，磨粒二维特征提取的研究，尤其是提取能唯一准确描述磨粒的本质形态特征的参数，用尽可能少的特征参数包含尽可能多的特征信息，仍然具有重要意义。本书应用混沌和信息熵理论实现对不同磨粒边界波形二维特征的提取，研究特征参数与磨粒边界复杂程度的关系。

磨粒群特征提取是磨粒识别技术的深化，目的在于定量描述磨粒尺度和数量的信息，这些信息可用于反映磨合状态。本书从磨粒群图像的纹理和色彩信息出发，基于分形理论提取磨粒群图像特征参数，进行磨粒尺度和数量的描述，以准确刻画磨粒群信息。

在内燃机磨合磨损机理的研究中，分形理论的引入，为解决难以处理或表达不准确的复杂摩擦学问题提供了新的行之有效的方法。分形维数能够定量描述信号时域变化的特征，利用振动信号的分形特征提取，可以从不同角度挖掘振动信号的特征信息，是充分利用检测设备资源，实现内燃机磨合过程评定的有效途径。然而，由于目前的振动信号检测方法和关联维数计算等环节的不确定性，使得利用内燃机振动信号的分形特征进行状态监测和故障诊断的重复性较差，从而影响了分形理论在内燃机状态监测和故障诊断中的运用。由于单重分形维数只能从整体上反映信号的不规则性，缺乏对局部特异性的刻画，所以仅用单重分形维数来描述振动信号显然是不够的。

多重分形是 20 世纪 70 年代由 Mandelbrot 在论述湍流问题时引进的，是为研究自然中非均匀和各相异性现象而提出的，是分形理论的进一步发展。多重分形方法是一个非常有用的工具，在物理、地质、材料科学，特别是在模式识别、自然图像的模拟和信号处理等方面都得到了广泛的应用。磨合过程是一个复杂的分形过程，应用多重分形理论进行分析将有助于磨合机理的深入研究，也是国内外状态监测和故障诊断领域最近几年兴起的研究方向。但是，由于多重分形谱的计算比较复杂，只有少数比较特殊的集合才有解析解，而对于一般的集合通常无法获得解析解，是一个非常值得关注的问题。本书在系统研

究分形理论的基础上，提出多重分形谱的简化算法，并应用于内燃机磨合过程的振动信号特征提取。

全书是在 5 篇硕士论文和 2 篇博士论文的基础上完成的，由博士生导师关德林教授构思和审定，他的学生李国宾副教授、王宏志教授、魏海军教授执笔撰写完成。

本书是我们多年开展轮机故障诊断及预测预警技术以及柴油机磨合技术研究的成果，是集体智慧的结晶。其中的数据均来源于大连海事大学油液检测中心（中国船级社认证机构）、辽宁省船舶装备维修工程技术研究中心，以及一汽集团大连柴油机厂。在研究中得到了辽宁省科技厅和一汽集团大连柴油机厂等单位的大力支持，承蒙诸多国内学者、专家的指教和帮助。本书荣获大连市人民政府资助，由大连海事大学出版社编辑出版，特致谢意。

由于作者水平所限，书中缺点和错误难免，恳请广大读者和专家指正。

作 者

2008 年 3 月

目 录

第1章 磨合过程概述	1
1.1 摩擦学基础	2
1.2 磨合过程.....	19
参考文献.....	32
第2章 磨合过程量化分析的数学方法	37
2.1 小波基本理论	37
2.2 分形基本理论	49
2.3 混沌的基本理论.....	55
参考文献.....	65
第3章 摩擦副表面的量化分析	68
3.1 表面质量对磨合的影响	70
3.2 表面的测量方法	73
3.3 表面粗糙度理论.....	77
3.4 表面形貌图像特征参数算法研究.....	82
3.5 Sierpinski地毯表面形貌图像特征提取	88
3.6 案例研究.....	95
3.7 本章小结.....	109
参考文献.....	110
第4章 润滑油的光谱量化分析	113
4.1 光谱分析.....	113
4.2 光谱分析特征信息描述	115

4.3 案例研究.....	117
4.4 本章小结.....	121
第5章 磨粒铁谱的量化分析.....	123
5.1 单个磨粒特征参数的提取及分析.....	123
5.2 磨粒群特征参数的提取及分析.....	135
5.3 本章小结.....	146
参考文献.....	147
第6章 摩擦振动信号的量化分析.....	149
6.1 多重分形理论.....	149
6.2 W-M分形模拟曲线的多重分形.....	160
6.3 摩擦振动信号的单重分形和多重分形.....	167
6.4 本章小结.....	183
参考文献.....	184
第7章 内燃机台架试验振动信号的量化分析.....	185
7.1 内燃机不同运行状态振动信号的多重分形.....	185
7.2 内燃机磨合过程振动信号的多重分形.....	190
7.3 本章小结.....	200
参考文献.....	200
第8章 量化分析方法在内燃机台架磨合评定中的应用.....	201
8.1 内燃机台架磨合评定方法.....	201
8.2 4D32 普通型柴油机台架磨合案例.....	204
8.3 6DF2L型柴油机台架磨合案例.....	208
8.4 本章小结.....	218

第 1 章 磨合过程概述

随着摩擦学的发展,人们对机器设备磨合的研究越来越深入。工业发达国家对磨合机理和过程以及如何提高磨合质量、缩短磨合时间,进行了大量试验研究。磨合过程(Wear - in Process),又称跑合过程(Running - in Process),是指新的摩擦副在初始运行阶段,表面逐渐被磨平,真实接触面积逐渐增大,磨损速度逐渐减慢过渡到稳定磨损期的过程。在此过程中摩擦、磨损和润滑性质均发生了一系列的变化。稳定磨损期是指磨合期结束以后摩擦学状态基本稳定的正常工作阶段。磨合机理是指磨合期内表面相互作用及其各种物理现象内在的根本联系。

摩擦副的磨合按运动形式可分为滑动摩擦副磨合和滚动摩擦副磨合两种。滑动摩擦副的接触形式可分为面接触、线接触和点接触三种;滚动摩擦副的接触形式则分为线接触和点接触。国内关于摩擦副磨合过程的研究已引起越来越大的关注,这对于认清具有相对运动的零件接触的初始工作状态,提高机械设备的工作性能、可靠性和维修性具有重要的意义。

然而,由于磨合磨损是发生在零件表面的微动态过程,是涉及力学、材料学、物理学、化学和传热学等多学科交叉的过程,因而磨合磨损行为十分复杂而且很难实时观测,无论在材料学或在摩擦学领域,仍然是在理论和实践上都还不够完善的研究难题之一。

在生产实际中,虽然磨合技术早已被广泛应用,但是进行专题的研究还只有 20 多年的历史。20 世纪 70 年代以前,研究工作基本上只局限于观察表面现象。1981 年在法国 Lyon 召开的第 8 次 LEEDS—LYON 国际摩擦学研讨会,是一次大规模专门交流磨合研究成果的国际性学术会议,由此可见,磨合的重要性。

磨合研究的重要意义有两个方面：第一，磨合是改善摩擦副润滑性能的重要手段，工艺简单、方便，且经济效果显著。第二，通过观察、研究磨合过程中摩擦副表面形貌的连续变化以及这些变化对润滑性能的影响，有助于人们搞清表面形貌的润滑效应，从而有目的和科学地控制表面形貌。

1.1 摩擦学基础

在宇宙中的运动物体间普遍存在着摩擦、磨损和润滑现象。

1966 年英国前教育部大臣 JOST 在学术报告中第一次对摩擦学（Tribology）进行了解释，之后得到了国际学术界的普遍认同。

摩擦学被定义为“关于相对运动、相互作用的表面以及与其相关的实际应用的科学与技术”，是由摩擦、磨损、润滑构成的分科知识体系。

摩擦学研究的意义在于：研究材料与能量消耗的不可逆过程；更好地解决摩擦、磨损和润滑的实际问题；能够以较小的投入，获得更大的产出，提高经济效益。

1.1.1 摩擦（Friction）

众所周知，任何两个做相对运动的相互作用表面都存在摩擦。

人们对摩擦的认识和利用也在不断地深入和扩展。尽管如此，摩擦的认识和利用在大多数情况下仍然出于人们的直觉和经验。即使在科技进步的当今，对摩擦的宏观观察仍然是研究问题的基础。

1.1.1.1 摩擦的定义

两个相互接触的物体在外力作用下发生相对运动或具有运动的趋势时，在接触面间产生切向的运动阻力或阻力矩，这个阻力叫做摩擦力，产生的阻力矩称为摩擦力矩，这种现象就是摩擦。

简言之，摩擦就是两个相互运动的物体接触表面间的相互作用。这种作用是复杂的，包括机械作用与原子、分子间的相互作用。

摩擦的影响因素主要有：（1）接触表面运动学方面，即两接触表面间相对运动的大小和方式；（2）接触表面动力学与静力学方面，即外界作用的载荷和位移；（3）接触表面的环境条件，如温度、润滑状况；（4）接触表面的形貌，如表面粗糙度、尺寸、形状；（5）接触表面的材料性质，如成分、组织、性能等等。

1.1.1.2 摩擦的分类

现代机械设备中的摩擦副的环境条件恶劣，工况越来越复杂。其摩擦学性能虽然各具特点，但是几乎都可以由简单的摩擦形式综合而成。

摩擦简要分类如下：

按摩擦副的运动形式不同，可以分为：

（1）滑动摩擦（Sliding Friction）——接触表面相对滑动或有相对滑动趋势的摩擦。

（2）滚动摩擦（Rolling Friction）——物体在力矩作用下沿接触表面滚动的摩擦。

按摩擦表面的润滑状态，可以分为：

（1）干摩擦（Dry Friction）——表面间无任何润滑剂或保护膜의纯金属接触时的摩擦，摩擦系数最大。

（2）边界摩擦（Boundary Friction）——摩擦表面被吸附在表面的边界膜隔开，但又未能覆盖住微凸体，其摩擦学性质取决于边界膜和表面的吸附性能，摩擦系数较大。

（3）流体摩擦（Fluid Friction）——摩擦表面被流体膜隔开，摩擦学性质取决于流体内分子间黏性阻力的摩擦。流体摩擦时的摩擦系数最小，且不会有磨损产生，是理想的摩擦状态；

（4）混合摩擦（Mixed Friction）——摩擦表面间处于边界摩擦和流

体摩擦的混合状态，称为半流体摩擦（Semi-fluid Friction），半流体摩擦能有效降低摩擦阻力，其摩擦系数比边界摩擦时要小得多；摩擦表面间处于边界摩擦和干摩擦的混合状态，称为半干摩擦（Semi-dry Friction），半干摩擦的摩擦系数比干摩擦时要小得多。

四种滑动摩擦形式如图 1.1 所示。

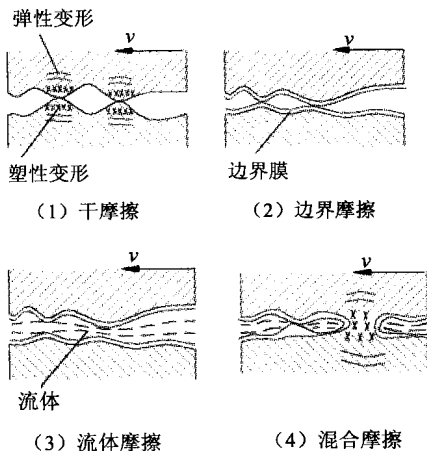


图 1.1 滑动摩擦形式

1.1.1.3 摩擦的机理

摩擦的机理可以概括为两种基本作用：

(1) 机械作用

机械作用主要表现为摩擦表面在外力作用下相互接触、变形，以及摩擦热作用。摩擦表面的接触包括名义接触和真实接触；接触后的变形包括弹性变形与塑性变形；摩擦产生的热可以使局部表面再结晶恢复或淬火强化。

(2) 原子、分子间的相互作用

原子、分子间的相互作用主要表现为摩擦表面上的物理、化学吸附与化学反应，以及原子间的扩散作用。吸附膜不同，其摩擦学性质也不

一样。当原子间达到扩散的条件，黏着无法避免。

Stribeck 曲线如图 1.2 所示，是对摩擦复杂作用机理的概括。

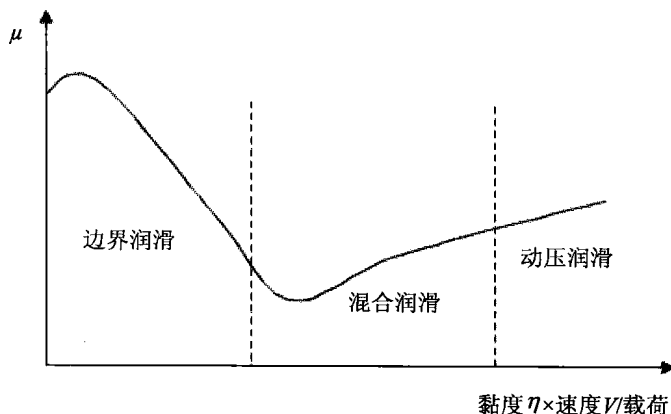


图 1.2 Stribeck 曲线

1.1.1.4 摩擦理论的发展

(1) 早期摩擦理论

人类对摩擦现象的认识和利用历史悠久。如史前人类的钻木取火。春秋时期我们的祖先已应用动物脂肪来润滑车轴，《诗经·邶风·泉水》中就有“载脂载宣，还车言迈”的诗句。应用矿物油作润滑剂的记载最早见于西晋张华所著《博物志》，书中提到酒泉延寿和高奴有石油，并且用于“膏车及水碓甚佳”。据有关资料记载，14 世纪以前，我国在掌握轴承、滑车、齿轮、凸轮及润滑技术方面一直居于世界前列。

国外摩擦学的发展与我国大同小异，古埃及的劳动人民在劳动实践中使用了滑轮及滑动轴承。欧洲 12 世纪出现了我国两汉时期的水力机械。13~14 世纪出现了脚踏车纺车与水力、风力发动机。

在古代，大家都知道摩擦的存在，润滑剂的用途，以及轴承中金属复面层的优点。但是，差不多两千年来未对它们作过科学的解释。

然而，长久以来关于摩擦的研究进展缓慢，直到 15 世纪，意大利

的达·芬奇 (Leonardo. Da. Vinci, 1452 ~ 1519) 才开始摩擦的理论研究。他在 1508 年的笔记中记录到“一切物体, 刚要开始滑动, 便产生叫做摩擦力的阻力。此摩擦力之大小, 在表面是光滑的平面与平面间摩擦时, 为其重量的四分之一”。也就是说, 对于光滑的固体表面, 给予摩擦系数以 0.25 这个数值, 第一个确立了比例常数即摩擦系数这个概念。他还指出: 同等重量的物体的摩擦力与其接触面积无关, 即摩擦力和垂直力之间的正比例关系。因此, 形成两个摩擦定律。

在达·芬奇以后的两百年间, 由于制造业尚处在手工副业和家庭工业的水平, 所以不可能把对摩擦的研究提到科学技术的议事日程上来。但在 17 和 18 世纪出现了两件事, 对科学技术的发展具有深远的影响, 第一件是欧洲许多大国和美国相继设立了科学院, 第二件大事是不断地出现机动的机器和开始进行工业革命。法国工程师阿芒顿 (G. Amontons, 1663 ~ 1705) 则是这个时代摩擦研究的先行者, 是在实验室内对摩擦有系统地进行研究的最早的人, 是第一部摩擦原著的作者。他于 1699 年在法国皇家科学院学报上发表了当初由雷纳德发现而未作为定律提出的两条摩擦定律, 第一定律是摩擦力与法向载荷成正比, 第二定律是摩擦力与物体的接触面积无关。他在研究摩擦力与接触面积的影响问题上注意到了相同接触面的压力时, 接触面积大 (因而载荷也大) 和接触面积小 (因而载荷也小) 时, 摩擦系数之不同。他认为“摩擦力和压力、滑动速度等之间的关系是复杂的”。在探讨摩擦产生的原因时, 他认为摩擦是由于一个表面沿着另一个表面的微凸体上升做功, 或者是由于微凸体发生弯折, 或者是由于微凸体发生断裂而引起的, 形成了凹凸说的理论雏形。

关于摩擦产生的根本原因, 经过漫长的讨论终于在 18 世纪的中叶, 使凹凸理论逐渐巩固下来, 无论哪种摩擦的实验定律, 都从凹凸说的立场上加注了暂时的理论, 并不断以新的实验获得加强。18 世纪末, 终于由库仑将凹凸说最后完成。

然而, 在 1734 年, 英国物理学家德萨古利埃 (J. T. Desagulier, 1683 ~

1744) 在《实验物理学教程》中, 提出了另一个大胆的设想, 他认为产生摩擦力的真正原因在于摩擦面所持有的分子力, 主张表面越是光滑, 摩擦力就越大, 其原因为表面愈是光滑, 摩擦面越相互靠近, 表面的分子力的影响越显著。他还指出, 当表面被大气层中的湿气所润湿时, 也产生黏附现象, 并介入摩擦, 这就是今天的固液体膜导致黏附的早期论述。

1785 年, 法国库仑 (E. Coulomb, 1736 ~ 1806) 继前人的研究, 用机械啮合概念解释干摩擦, 提出摩擦理论, 在物理学和机械学的领域里确立了“库仑摩擦定律”。库仑的实验结果如下:

①在干燥状态下, 经过足够长的接触时间之后的木(橡树)与木(橡树)的(静)摩擦力, 与垂直载荷成正比。不过此摩擦力在接触开始的数分钟内随时间有稍许的增大, 以后即变为饱和状态。

②同样在木与木的干燥状态下的(动)摩擦力, 速度不太大时, 也与垂直载荷成正比。但此时的摩擦力小于经过片刻接触时间后的(静)摩擦力。

③金属与金属之间干燥状态的摩擦力也与垂直载荷成正比。放置一定时间后的(静)摩擦力, 与用某种速度滑动时的(动)摩擦力之间没有差别。

④在干燥状态下, 用不同的材料滑动时, 比如用木与金属相摩擦时的结果, 得出与前面完全不同的结果。如摩擦力受到使之接触之后到引发滑动止的时间的影响, 四五天之内, 有时候较之更久的期间, 呈现出缓慢地增大的倾向。而金属与金属相摩擦的场合, 在一刹那间便饱和, 木与木的场合, 也在几分钟内就饱和了。木头与金属接触时因为随接触时间而产生的摩擦力的增加过程非常缓慢, 对于速度非常缓慢的木头与金属的(动)摩擦力, 与接触时间相隔了三秒后的(静)摩擦力几乎一样。另外, 在干燥状态下, 对于木与木的摩擦和金属与金属的摩擦说来, 几乎不受滑动速度的影响。但在木头与金属接触的场合, 依然呈现摩擦力随着速度的增大而增大的倾向, 速度按几何级数的方式增大, 与

此同时，摩擦力也按算术级数的方式增大。

在库仑之后，许多从事摩擦研究的人员，对上四条结果反复验证，去粗存精，才最后确立了库仑定律。

(2) 现代摩擦理论

自 15 世纪的达·芬奇到 18 世纪的库仑这 300 年间，有关摩擦研究的历史是以摩擦定律为中心而发展的。为了追求摩擦定律，先辈们在科学和技术进步的曲折道路上终于获得了初步的结果。对于当时的研究者来说，探讨摩擦产生的原因是属于第二位的。自库仑以后的 100 年，直到 19 世纪末，有关摩擦的实验定律大体上已确立完毕。由于当时科学技术的限制，19 世纪关于固体摩擦的机理的研究，以毫无显著的进步而告结束。直到 20 世纪的表面加工技术和接触测量技术的进步，关于摩擦定律的解释，又重新在英国引起了兴趣，这就是德萨古利埃的分子说的再认识。如果说 19 世纪以前的关于摩擦的争论是为了确立摩擦定律而进行的话，可以说 20 世纪关于摩擦的争论是围绕着解释摩擦定律而进行的。一方面是传统的凹凸说，而另一方面是新兴的黏着说（分子说的发展）。从 20 世纪 40 年代开始，“凹凸理论”与“黏附理论”进一步靠拢，成为“黏附—变形”理论和“分子—机械”理论。其中比较典型的是英国的鲍登(F. P. Bowden, 1903 ~ 1968)和苏联的克拉盖尔斯基(Крагельский)。

鲍登，英国皇家学会会员，剑桥(Gonville & Caius)学院的研究员，自 1939 年在澳大利亚墨尔本的澳洲科学与工业研究处建立了摩擦实验室以来，长期从事摩擦学研究，在摩擦、爆炸灵敏性和断裂方面作出了奠基性和首创性的贡献，是现代摩擦理论的创始人之一。自 1939 年以来鲍登和他的学生泰伯在英国皇家学会会报上发表了三篇关于外摩擦本质的创造性论文。他们首先在滑动条件下测量了真实接触面积，然后查明了接触斑点上发生高温闪燃的原因，建立了关于在两摩擦面间产生“冷焊”的原理，从而创建了“黏着—变形”摩擦理论。“黏着—变形”摩擦理论认为：由于表面的凹凸不平，当两金属表面在负荷下接触时，则在