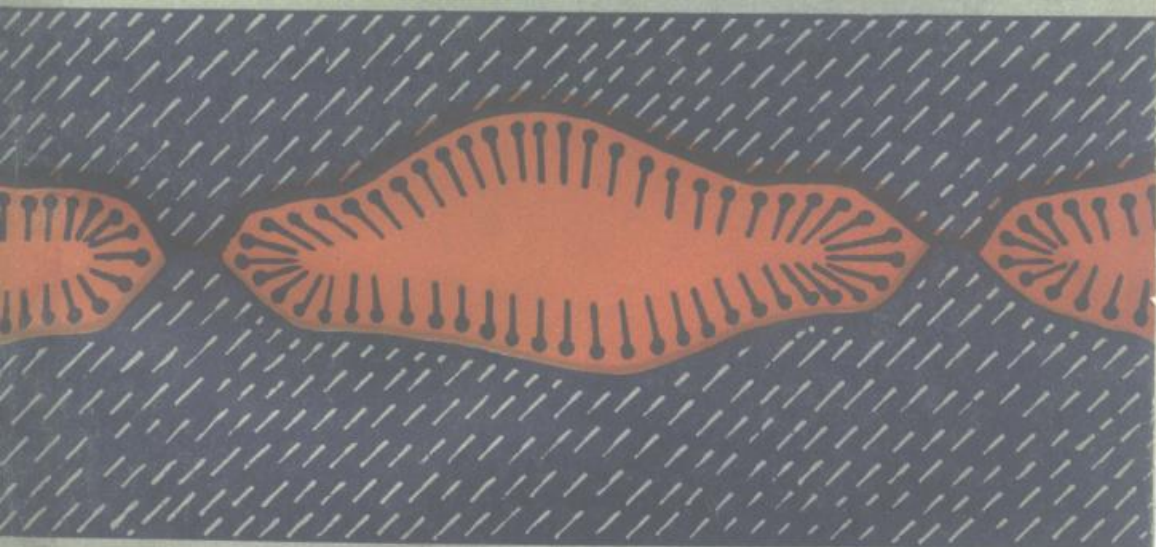


固体的摩擦与润滑

续篇

THE FRICTION AND
LUBRICATION OF
SOLIDS PART II



〔英〕 F. P. 鲍登
D. 泰伯 著

机械工业出版社

固体的摩擦与润滑 (续篇)

[英] F. P. 鲍登 D. 泰伯 著

袁汉昌 张绪寿 **陈绍澧** 译

余志英 校



机械工业出版社

2006/12

一九八二年我社出版了译著《固体的摩擦与润滑》，本书是它的续篇，也是一本实验研究专著。

本书进一步介绍了有关固体摩擦研究的新技术和新成果。书中除介绍金属材料的摩擦外，还详细地介绍了非金属材料（脆性的、坚硬的、层状结构的、弹性或塑性的）的摩擦特性；讨论了边界润滑与润滑剂单分子层的结构和作用；特殊条件（高温、高速、高应变率）下的摩擦；滚动摩擦和粘着机理；压痕与划痕硬度的物理意义等。

本书由邵荷生教授对大部分译文再次进行了审校。

本书可供从事科研、生产、教学的科技人员及大专院校师生参考。

The Friction and Lubrication
of Solids

by F. P. Bowden and D. Tabor

Part I

Oxford

at the Clarendon Press

1964

* * *

固体的摩擦与润滑（续篇）

〔英〕 F. P. 鲍登 D. 泰伯 著

袁汉昌 张绪寿 陈绍澧 译

余志英 校

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可出字第 117 号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092¹/₃₂·印张 20⁵/₈·字数 449 千字

1986 年 9 月北京第一版·1986 年 9 月北京第一次印刷

印数 0,001—3,500·定价 4.85 元

*

统一书号：15033·5764

前 言

我们在 1950 年写过一本介绍在固体表面间接触和滑动过程中所发生的物理过程以及摩擦和边界润滑机理探讨的实验研究专著——《固体的摩擦与润滑》(于 1954 年再版)。在这头一本专著中(现称为第一册)着重介绍了金属表面的性状。它表明了金属表面间的接触仅仅发生在若干小的局部区域,因而摩擦性状可以用在这些微小的界面结点的形成和相继的剪切来解释。此外,摩擦的另一组成部分来自滑动表面的变形、挖沟和刨削。

我们一直在继续进行这方面的探讨,本书就是介绍其后的研究工作,所以是第一册的续篇。虽然每本书的内容可以分开来阅读,但两者又成为一个整体。本书除了讨论在金属上所做的进一步研究工作以外,还较详尽地讨论了非金属固体的摩擦性状,它表明了因表面变形导致的能量损耗可以成为总摩擦损耗的一大部分——特别是在滚动摩擦和某些类型的滑动摩擦上更是如此。诚然,在这种状态下,用固体物质的粘—弹性来描述其摩擦性状是可能的。

库伦在讨论摩擦的各种可能机理时断言“只有实验才能定论”,因而在本书中所强调的也是实验的手段。除了在摩擦方面的研究外,书中还探讨了与固体接触和变形有关的几个其他物理过程。这些物理过程包括:固体表面的本性和结构;固体颗粒的大小和其表面缺陷对其强度性质的影响;收窄作用在导体的电性质上的效应和它在接触电阻上所起的作用;

粘着作用机理；压痕及划痕硬度的物理意义；分子平表面的接触状态；表面力的作用范围；在高应变速率下固体的变形；因液体撞击导致的固体的蚀损等。

首先，我们对过去和现在的同事和学生为完成本书所作的贡献表示感谢。由于他们为数众多，在此无法一一列举，但在正文中都提到了。我们还对协助我们整理手稿的 E. L. 摩里斯和克莱连顿出版社，特别是对 A. M. 伍德的制版技巧和耐心的合作表示谢意。

我们要对 N. 马特教授的支持和鼓励，对 O. 文斯博路琼思、R. 科克波恩爵士、H. 瑟顿及 N. J. L. 麦逊博士对我们的工作不断给予关怀表示感谢。也要感谢皇家学会的慷慨协助和航空局及科学与工业研究处的大力帮助。

F. P. 鲍 登

D. 泰 伯

剑桥·卡文迪茨研究所

固体物理及化学研究室

一九六三年元月

目 录

前言

绪言	1
----------	---

第一章 固体表面	6
----------------	---

反射电子显微术	6
---------------	---

扫描电子显微镜	8
---------------	---

X-射线扫描显微分析仪	11
-------------------	----

电子衍射法	12
-------------	----

场发射显微术	15
--------------	----

高分辨率电子显微术	16
-----------------	----

1. 晶格的分辨	16
----------------	----

2. 高聚物分子的观察	18
-------------------	----

3. 裂变碎片形成的轨迹	21
--------------------	----

波纹 (云纹边 Moire' Fringe) 技术	21
---------------------------------	----

表面形貌的美饰	24
---------------	----

固体表面的外观	26
---------------	----

在空气中的金属表面	27
-----------------	----

机械加工的表面	27
---------------	----

增补	28
----------	----

参考文献	29
------------	----

第二章 尺寸大小和表面结构对固体强度的影响	32
-----------------------------	----

玻璃及其他非金属纤维的强度	33
---------------------	----

一些非金属须的生长特征和强度性质	37
------------------------	----

生长台阶是应力集中的源泉	37
--------------------	----

金属须的强度	41
--------------	----

表面活性物质对金属强度的效应	43
固体的摩擦磨损的含义	44
参考文献	45
第三章 金属的接触	48
I. 尘埃对固体接触的影响	48
表面光洁度和颗粒大小的效应	50
负荷的效应	51
颗粒相对硬度的效应	53
颗粒污染的效应	53
II. 电流对金属接触的影响	54
III. 贵金属的摩擦与导电性及加工硬化表面层的效应	57
金的表面	58
铂	60
银和钯	61
IV. 贱金属的摩擦与导电性氧化物层的效应	61
铟和锡	61
铅	62
铝	63
铜	64
钢	65
铬	68
异类金属	69
氧化物膜对金属摩擦的效应	70
结论	72
参考文献	73
第四章 金属摩擦的机理: 综合应力与表面污染的作用	74
切向力在金属物体接触中的效应	78
方法	79

位移	80
接触导电率	82
位移的可逆性	85
润滑剂膜的效应	89
切向力在弹性地加载的物体上的效应	90
宏观滑动	95
结点生长的基本公式	97
宏观滑动的条件	99
粘—滑运动	103
弹性地加载表面的摩擦系数	105
扩展表面间的摩擦	107
加工硬化及延展性	109
结论	110
参考文献	112
第五章 洁净金属的粘着	115
仪器	116
彻底地净化对摩擦与粘着的效应	118
粘着力与切向力的关系	119
在升高温度下的粘着：延展性的效应	125
开始产生强力粘着时的温度	128
大型的模拟结点的性状	129
金属在空气中的粘着	131
金属粘着的一般机理	133
结论	136
参考文献	137
第六章 在机械加工过程中的金属转移	139
从铁锤上的转移	139
从钳子和夹子上的转移	140
从螺丝刀及扳手上的转移	141

从刀头上的转移	143
从麻花钻上的转移	145
从刨机上的转移	145
向非金属材料上的转移	146
金属转移的意义	146
结论	148
参考文献	148
第七章 脆性固体的摩擦和粘着	150
岩盐的摩擦	151
岩盐的变形性质	151
在压缩状态时的应力—应变曲线	155
岩盐的压痕硬度	157
摩擦轨道的塑性变形	158
岩盐的粘着	160
摩擦、变形和粘着	161
其他脆性材料的摩擦	163
参考文献	164
第八章 冰及固态氮的摩擦、粘着和变形性质	166
I. 冰的粘着和强度性质	166
粘着的测量	167
初步试验：残余应力与剪速	167
冰对洁净金属表面的粘着	169
冰中的蠕变	170
表面沾染在不锈钢上的效应	171
对高聚物的粘着	173
溶解盐类在冰的粘着上的效应	175
冰对金属和塑料的粘着	178
I. 冰的摩擦	179
冰的摩擦与粘着	182

Ⅱ. 固体氮的摩擦与变形	183
摩擦结果	184
硬度	185
摩擦与剪切强度	187
固态氮的摩擦性状	187
参考文献	188
第九章 雪橇在雪和冰上的摩擦	190
雪橇在雪和冰上的静摩擦	190
在雪和冰上的动摩擦	193
用雪橇作滑雪实验	194
硬度随温度及速度的变化	195
接触角及润湿的影响	198
结论	200
参考文献	201
第十章 金刚石的变形与摩擦	202
金刚石的表面能	203
球形压头使金刚石产生的变形	205
在冲击下裂纹的形成——温度和反复冲击的效应	207
在滑动中形成裂纹的临界负荷	208
金刚石中的塑性流动	211
金刚石在空气中的摩擦和表面损坏	214
定向作用的效应	216
金刚石在真空中在低负荷下的摩擦	219
金刚石在空气中在较高负荷下的摩擦和表面损坏	220
金刚石的磨损和磨蚀	224
金刚石在玻璃上的滑动	226
在极高速度下金属在金刚石上的滑动	230
金刚石的摩擦与磨损	233
参考文献	234

第十一章 层状结构固体的摩擦	237
I. 石墨	237
结构和变形性质	237
石墨在空气中的摩擦和变形	238
洁净的石墨在室温及高温下的摩擦	239
表面膜对石墨的摩擦的影响	241
石墨的摩擦机理	243
II. 氮化硼	244
氮化硼在空气中的摩擦	245
脱气氮化硼的摩擦	246
III. 二硫化钼	248
MoS_2 在空气中的摩擦	249
蒸汽对 MoS_2 的摩擦的影响	249
MoS_2 在真空中的摩擦	249
MoS_2 的摩擦机理	250
IV. 云母	251
云母在空气中的摩擦	252
云母和滑石	255
层状结构固体的摩擦性质	256
参考文献	257
第十二章 层状结构固体的润滑膜	259
I. 层结构固体覆盖薄膜的性状	259
表面的电子衍射和显微研究	260
摩擦结果	260
石墨	260
二硫化钼	263
氮化硼	263
氮化硼及石墨膜	265
滑石	265

摩擦机痕	267
擦涂层的作用	267
I. 化学生成膜	268
铝及铀	268
硼	269
钛	269
铬及碳化钨	269
气相生成的层结构膜的作用	269
参考文献	270
第十三章 聚合物材料的摩擦和变形	272
界面的剪切强度	272
温度的效应	274
聚四氟乙烯的摩擦	274
聚四氟乙烯轴承	277
负荷在聚合物摩擦上的效应	278
A 随 V 变化的实验研究	281
说明接触面积随负荷变化的理论模型	283
聚合物的变形性质和摩擦	287
聚合物的变形	289
曲率的效应	290
面积测量与摩擦结果的关联	291
加荷时间的效应	295
定向效应	296
静电效应	298
高速下的摩擦	298
聚合物在滑动中的表面损坏	299
聚合物摩擦的机理	302
参考文献	303
第十四章 弹性固体的摩擦	306

I. 木材的摩擦	307
吸水作用	309
钢和聚四氟乙烯在湿胶枞木上的摩擦	310
木材的变形	313
硬球体在湿胶枞木上滚动	314
在湿木材上的滞后损耗	316
滚动摩擦的观测值及计算值间的定量关系	317
滑动中的界面粘附作用	319
在“干”木材上(含水量少于30%)的滑动与滚动	320
滚动摩擦	320
滑动摩擦: 钢表面	321
滑动摩擦: 聚四氟乙烯表面	322
在干木材上的润滑滑动	323
铁梨木的摩擦	323
木材在制纸浆时的变形与破碎	325
木材的摩擦机理	326
II. 橡胶在有润滑时的摩擦	327
圆锥形滑块的摩擦	329
在有润滑的滑动中的剪切项	331
润滑膜的功效与滞后损耗	332
以较高速度在湿橡胶上的滑动	334
轮胎在湿路面上的打滑	336
路面凸体的性质	337
过热与自由滚动摩擦	338
一些轮胎的使用试验	341
轮胎的滞后作用与磨损	342
橡胶摩擦的粘附项	343
弹性固体的摩擦	343
参考文献	344

第十五章 滚动摩擦的机理	346
I. 金属在塑性范围内的滚动	347
仪器	347
第一个穿程	349
滚道的变形	351
在滚道上的反复穿程	353
平衡状态	355
II. 金属在弹性范围内的滚动	357
无界面滑移的滚动	361
金属球在金属球上的滚动	361
经多次穿程后的平衡滚动状态	364
III. 在弹性与粘弹性材料上的滚动	365
每单位滚动距离的弹性输入能量	366
雷诺氏滑移	371
球体在平橡胶板上的滚动	374
希思科特滑移	375
滚动中的滞后损耗	378
布契和福罗姆以及阿泰克等的分析	385
IV. 金属在滚动中的滞后损耗	387
滞后损耗随应变的变化	390
滚动金属间的表面相互作用	392
球与滚子轴承的摩擦	393
参考文献	393
第十六章 固体的硬度	396
绪言	396
I. 金属的压痕硬度	396
金属在单轴向拉伸或压缩作用下的变形性能	397
恒屈服应力材料的压痕	399
恒屈服应力材料的维氏硬度	400

几何相似性原理	401
显微硬度的测量	402
可加工硬化材料的维氏硬度	405
洛氏硬度试验中的圆锥形压头	406
布氏硬度的测量	407
压痕周围的变形	410
硬度压痕的弹性恢复	416
I. 金属的压痕硬度与蠕变	417
温度效应	419
短加荷时间的效应	420
II. 固体的划痕硬度	422
非金属的压痕、摩擦和划痕	422
金属的划痕硬度	425
固体的莫氏硬度与压痕硬度之间的关系	427
金属与非金属的硬度	428
参考文献	429
第十七章 固体的磨损	431
磨损定律	431
负荷效应: 轻度和严重的磨损	431
严重磨损中结点的剪切	433
初生的磨屑特征	435
严重磨损中的磨损和转移	437
轻度磨损中的磨损和转移	439
环境效应	440
速度效应	442
磨料磨损	443
机械打磨及抛光表面的特征	447
磨损与磨料磨损	449
参考文献	449

第十八章 边界润滑作用	452
金属的边界润滑作用	452
温度效应	454
单分子润滑剂膜的摩擦、寿命与润湿性	457
单分子层的磨损	460
高聚物的边界润滑作用	460
纱线润滑中的流体动力因素	463
因次分析	465
速度、粘度和初始张力的效应	466
骨节的润滑	468
混合润滑	470
参考文献	472
第十九章 润滑剂单分子层的结构与性质	474
I. 吸附单分子层的结构和定向作用	474
在银及铂上的长链脂肪酸	474
加热的效应	477
长链胺类和醇类	478
全氟化的长链化合物	478
在活性金属上的长链脂肪酸	478
在银单晶上的长链脂肪酸	480
结构和定向作用	482
II. 吸附单分子层的结构	483
III. 润湿与接触角	486
IV. 硬脂酸钙单分子层的剪切强度	488
V. 单分子层的摩擦与电阻	491
参考文献	494
第二十章 光滑表面的粘着与表面能	496
I. 粘着作用的热力学; 粘着剂的作用	496
II. 分子平滑表面的粘着	501

XV

Ⅱ. 云母的表面能	503
Ⅳ. 表面能的计算	509
Ⅴ. 表面力的作用范围	511
增补	524
参考文献	524
第二十一章 固体在高温下的机械性质与摩擦性质	528
高温炉	528
Ⅰ. 耐火金属的抗拉性能	529
(a) 多晶体试样	529
抗拉强度测定仪与试样	529
温度对极限抗拉强度 (U. T. S.) 的影响	530
温度对屈服应力的效应	531
温度对断裂伸长率的效应	533
变形与断裂的形式	534
(b) 单晶体	536
Ⅱ. 耐火材料的硬度	539
测量硬度的仪器	539
硬度随温度的变化	543
变形的形式	544
Ⅲ. 固体在高温下的摩擦性质	547
多晶耐火固体的摩擦	548
耐火固体单晶体的摩擦	551
耐火固体的摩擦机理	552
参考文献	553
第二十二章 在极高速度下的摩擦	555
Ⅰ. 实验技术	556
减速技术	557
冲击技术	560
Ⅱ. 在高速下金属的摩擦与磨损	562