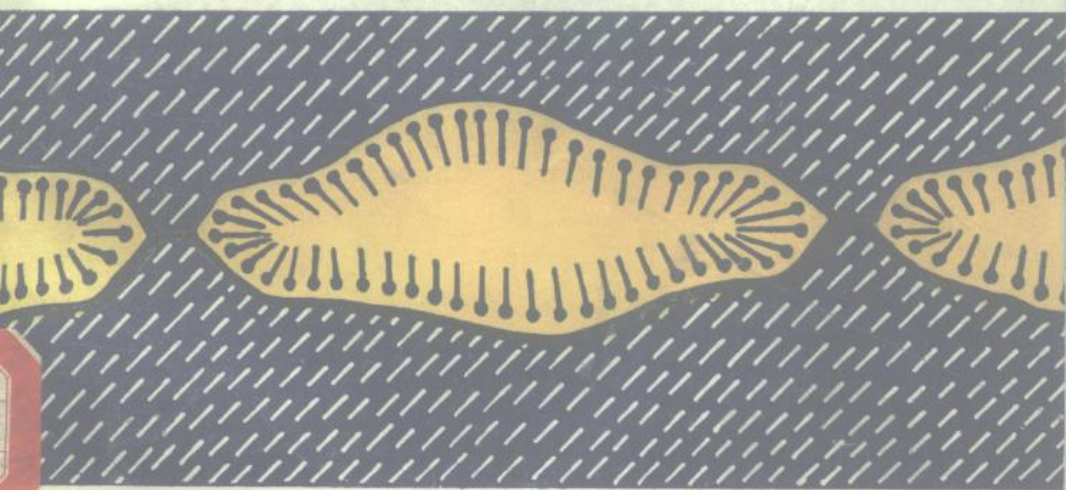


固体的摩擦与润滑

THE FRICTION AND
LUBRICATION
OF SOLIDS



[英] F.P. 鲍登 著
D. 泰伯

机械工业出版社

501.2
701

固体的摩擦与润滑

[英] F.P. 鲍登 D. 泰伯 著

陈绍澧 袁汉昌 丁雪加 译

陈绍澧 余志英 校



机械工业出版社

本书叙述固体特别是金属表面摩擦的物理化学过程以及摩擦与边界、极压润滑机理，并着重介绍了基础实验研究。内容包括：固体表面轮廓与接触状态的研究及测量技术、摩擦热、摩擦与表面损坏及测量、摩擦机理、轴承合金的作用、洁净表面的摩擦及沾污膜的影响、非金属的摩擦、边界摩擦与边界润滑机理、极压润滑、碰撞接触性质、磨损特征、表面间的粘附、摩擦与碰撞引起的化学反应等。是一本从事基础研究参考的专著。可供科研、生产、教学方面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
Oxford
at the Clarendon Press 1954

固体的摩擦与润滑

[英] F.P. 鲍登 D. 塔伯 著

陈绍澧 袁汉昌 丁雪加 译

陈绍澧 余志英 校

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第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787×1092 1/32·印张 14½·字数 316 千字
1982年11月北京第一版·1982年11月北京第一次印刷
印数 0,001—7,000·定价1.50 元

*

统一书号：15033·5332

译者的话

本书系英国剑桥大学的 F.P. 鲍登教授与 D. 泰伯教授及其同事们所从事在摩擦与润滑领域内的研究工作专著。作者们从固体表面上的物理-化学现象的角度出发,讨论了范围比较广泛的有关固体表面摩擦现象,而在内容上特别着重介绍实验研究。这是一本在摩擦与润滑领域内很好的基础研究的参考书,而且也是在1964年以前,国际上在摩擦与润滑领域的基础研究方面凤毛麟角的专著。我所前润滑研究室主任陈绍澧同志早年从事摩擦与润滑方面的研究工作,本书稿是在他的组织和亲自参与翻译、校订下,于1964年完成的。译稿已于1965年准备出版,但由于林彪及江青等对出版工作的破坏而被迫未能实现。陈绍澧同志也因受迫害于1968年春去世。

此稿因系1964年的原译稿,稿中个别专业名词可能与当前的译法略有出入,但译义仍是对的,故没有重新改译。

这本书的出版年代虽然较早(1954),但书中所介绍的基本理论与研究方法,仍然是当前摩擦磨损润滑领域内比较有参考价值的。

最后希望读者对本书稿的翻译工作提出宝贵的意见。

中国科学院兰州化学物理研究所

所长 申松昌

1979.2.23

原 作 者 序

本书叙述了在固体，特别是金属的滑动过程中所发生的物理和一部分化学过程的实验研究以及对摩擦和边界润滑的机理的考察。它所包括的范围比所用的题目稍广一些，而且涉及到固体表面的一系列物理性质。本书并非教科书，因其内容几乎全部为作者和他们的同事们所做的实验研究成果。研究仍在进行中，故很明显，还有许多未解决的和大量尚待进行研究的课题。

本研究是在第二次大战前几年在剑桥大学开始的，从1939年到1944年改在澳大利亚墨尔本的澳洲科学与工业研究处的摩擦物理实验室继续进行（虽然还加入了很多军事研究任务），此后又在剑桥大学恢复了研究。目前研究工作的某些方面仍继续与在S.H.巴士托博士（Bastow）领导下的墨尔本的摩擦物理实验室协作进行。

我们的工作得到了各方面的许多帮助。在这里谨向他们表示谢意：战前曾任润滑研究委员会委员的故W.哈迪爵士（Hardy）和D.派依博士（Pye）；D.里费特爵士（Rivett）和澳洲科学与工业研究处的执行委员们；墨尔本大学和特别是E.J.哈同（Hartung）教授，因为摩擦物理实验室目前仍设在他的研究室里；H.梯萨特爵士（Tizard）和鼓励我们再次在剑桥从事本研究的故R.符勒爵士（Fowler），最后是B.洛克斯彼萨爵士（Lockspeiser）和空军供应部的鼓励和支持以及他们赠予剑桥大学的使研究得以持续的慷慨

的研究经费；本研究也得到了E·阿普列顿爵士(Appleton)和科学与工业研究部以及其他方面的重视和帮助。

在编写本书时我们得到了本实验室的过去和现在的成员以及S.H.巴士托博士和摩擦物理实验室工作人员的很多帮助。他们的姓名都将在本书正文内列出，在此恕不一一列举。

剑桥大学物理化学系
摩擦固体物理及化学实验室
1949年2月

附 注

在本书中描述的实验研究问题仍在继续中。为使本书内容跟上发展情况，特在书后增补篇中补述了一些最近的工作及有关文献*（正文内凡注有[A]处者在增补篇中皆有补述）。正文本身也有一些修正和更改。

F.P. 鲍登
D. 泰伯
1953年11月

* 为了阅读方便起见，译者将增补篇分别插在正文各相应章节之后——译者注。

目 录

绪论	1
第一章 固体间的接触面积	5
表面不平度与表面轮廓的测量	5
1. 触针法	5
2. 光干涉法[A]	6
3. 电子显微镜法[A]	8
4. 钝角截面法	9
固体间的接触面积	10
1. 球状的凹凸点	11
2. 工作硬化的效应	16
3. 圆锥状与角锥状的凹凸点	19
4. 真实接触面积	24
5. 真实及表观接触面积	24
6. 减荷后效	27
用电阻法测量真实接触面积	30
1. 负荷对接触电阻的影响	33
2. 平面间的接触	35
增补	38
第二章 相互摩擦的固体表面温度	42
滑动金属的表面温度	42
1. 表面温度的计算	42
2. 表面温度的测量	45
3. 滑动金属的温度	46
4. 润滑表面的温度	49
5. 表面温度的波动特性	51
6. 表面温度与导热性	51

非导体固体的表面温度	53
1. 热点可见时的温度	53
2. 导热性和热点的出现的关系	54
3. 热点的照像记录	56
4. 磨料在热点出现中的效应	57
5. 滑块大小与形状的影响	59
6. 瞬时热点的测量[A]	60
表面温度的更精确的计算	63
增补	71
第三章 摩擦热在表面流动上的效应	72
固体的抛光和表面流动[A]	72
1. 熔点的影响	75
2. 抛光的机理	77
3. 一种典型的抛光剂的作用	78
在冰和雪上滑动的机理[A]	80
1. 压力熔融	80
2. 由摩擦热引起的熔融	81
3. 水层的形成	81
4. 温度的效应	82
5. 导热性的效应	83
6. 静摩擦与动摩擦以及速度的影响	84
增补	88
第四章 滑动金属的摩擦与表面损坏	91
摩擦的测量	91
1. 静置表面温度的测量	93
2. 表面的制备	96
金属的摩擦	96
用化学和放射性方法检查金属的转移[A]	101
在轻负荷下的摩擦与表面损坏[A]	102
金属摩擦的早期理论	106

增补	118
第五章 金属的摩擦机理[A]	119
剪切及切削的作用	119
1. 切削项 P	122
2. 剪切项 S	124
3. 金属结点的剪切强度	126
4. 阿芒汤定律	128
s 与 P 的相依性	131
接触的紧密程度及表面膜的影响	135
间歇运动	136
金属薄膜的润滑性	143
1. 摩擦作为摩擦痕宽度的函数	148
2. 膜厚的极限	150
3. 膜的破裂	150
4. 膜的损坏	151
5. 温度效应	153
以金属膜作润滑剂	155
增补	157
第六章 轴承合金的作用[A]	160
铜-铅轴承合金	161
1. 铜、铜和铅的摩擦性状	162
2. 在铜上的薄铅膜	162
3. 铜-铅合金	164
4. 磨损在摩擦上的效应	165
5. 温度在摩擦上的效应	167
6. 薄膜在轴承合金上的作用	169
7. 树枝状和非树枝状合金的性状的比较	170
白金属轴承合金	171
1. 铅基合金: 结构和硬度	171
2. 无润滑的表面	173

3.有润滑的表面	176
4.基体和硬颗粒的作用	176
5.锡基合金: 结构和硬度	177
6.无润滑的表面	178
7.有润滑的表面	179
8.铅基和锡基轴承合金的比较	180
银-铅轴承	180
温度的变化对轴承合金的效应	181
软组分在轴承合金中的作用	183
增补	190
第七章 洁净表面的摩擦: 沾污膜的效应	192
表面膜的影响	192
1.吸附的气体在金属摩擦上的效应[A]	193
2.氧化物膜对摩擦的影响[A]	197
温度对洁净金属摩擦的影响	199
界面电位对摩擦的影响	201
1.电沉积的氢及氧的效应	201
2.摩擦和表面张力	205
石墨的摩擦[A]	207
增补	210
第八章 非金属的摩擦	213
1.晶态固体[A]	214
2.蓝宝石和钻石[A]	214
3.碳、石墨及二硫化钼[A]	216
4.云母[A]	216
5.塑料[A]	217
6.塑料的摩擦焊接	219
7.碳化钨[A]	221
8.玻璃[A]	221

X

9. 橡胶[A]	222
10. 纤维[A]	223
表面不平整与金属的摩擦	227
增补	229
第九章 润滑金属的边界摩擦	239
流体润滑	239
长链化合物的边界润滑作用	241
1. 链长的影响	241
2. 温度的效应[A]	244
3. 溶液中的脂肪酸	247
单分子与多分子层的润滑性	248
1. 硬脂酸膜	249
2. 胆甾醇膜	253
3. 润滑剂层的磨损性质	254
4. 有效润滑的最小膜厚[A]	254
硅酮类和氟化烃类(氟碳润滑剂)的润滑性	256
负荷与速度对润滑表面摩擦的影响	259
1. 负荷的效应	259
2. 在很轻负荷下的润滑表面的摩擦	261
3. 速度效应	262
增补	268
第十章 边界润滑机理	271
化学反应的重要性	271
金属皂的润滑性	275
润滑剂层的结构: 电子衍射实验[A]	280
皂的形成机理: 水的影响[A]	283
用放射性方法考察表面吸附作用[A]	287
1. 脂肪酸类	288
2. 醇类	288

3. 酯类	288
脂肪酸、醇和酯在金属上的吸附[A]	288
边界润滑机理[A]	293
增补	302
第十一章 极压润滑剂的作用	308
用含氯化物润滑金属	309
1. 氯化物膜	309
2. 含氯化物	310
3. 氯化物形成的重要性	312
用含硫化物润滑金属	314
1. 硫化物膜	314
2. 硫化的化合物	315
3. 化学作用和表面膜的本质的性质	318
含磷的添加剂	320
极压添加剂的活性[A]	320
用于金属切削和拉制的极压润滑剂[A]	322
增补	329
第十二章 润滑剂膜的破裂[A]	333
运转着的发动机的活塞环和汽缸壁之间的润滑状况	334
1. 速度的效应	335
2. 粘度和温度的效应	335
轴颈与轴承间的润滑	342
负荷、速度、粘度和温度的效应	344
温度对润滑剂膜的影响	347
增补	352
第十三章 碰撞的固体间的接触性质[A]	353
球形表面	354
1. 屈服压力变动的效应	356
2. 恢复系数	360

3. 静态与动态硬度的比较	362
4. 撞击的时间	364
5. 撞击温度	368
6. 润滑剂膜的效应	368
平坦表面	370
1. 在液体膜中所产生的压力	375
2. 流动速度与剪切速率	379
3. 在液体膜中所产生的温度	380
实际应用上的意义	382
增补	386
第十四章 金属磨损的特征 [A]	387
局部粘附与磨损	387
薄金属膜的减磨性质	389
化学作用与磨损 [A]	395
表面氧化的重要性	399
润滑剂膜对磨损的影响	402
增补	405
第十五章 固体表面间的粘附: 液膜的影响	408
硬表面的粘附: 玻璃、铂和银	409
1. 表面粗糙度的影响	412
2. 湿度的影响	413
3. 由表面张力与粘度引起的粘附作用	414
软金属的粘附作用 [A]	416
1. 表面氧化的效应	420
2. 有润滑剂膜时的粘附	421
粘附与摩擦 [A]	423
增补	426
第十六章 由摩擦与碰撞引起的化学反应 [A]	431
压力、剪切与表面温度的影响	431

摩擦在摄影干板上的效应	434
炸药的分解	434
1. 摩擦的引发作用	434
2. 撞击的引发作用	435
3. 颗粒间的摩擦	436
增补	438
附录 一些典型的摩擦数值*	442

绪 论

摩擦的两个基本定律，即摩擦阻力与负荷成正比并与滑动表面的面积无关，久已为人们所熟知。可以认为列昂纳多·达芬奇（Leonardo da Vinci）（1452~1519）以他的惊人的天才和洞察力对这些定律早已有所了解并且用实验作了证明，因为他写道：“若重量加倍，则摩擦力也加倍”，和“同样重量所产生的摩擦尽管接触的深浅和长短不同，在运动开始时的阻力是相同的”。法国工程师阿芒汤（Amontons）在1699年重新发现的这些定律，为法国皇家科学院在有些惊奇和怀疑的情况下接受了：

在阿芒汤的讲话里，他直接了当地指出：通常认为两个相互移动的物体间的摩擦因接触面积的增大而增大是错误的。他说从实验得悉负荷愈大摩擦就愈大。这一新的见解在科学院内引起了震动。

这些观察被库伦（Coulomb）在1781年证实，他对静摩擦（使滑动开始所需的力）和动摩擦（保持滑动所需的力）作出了明显的区分。他指出动摩擦可以比静摩擦低得多，并观察到动摩擦几乎与滑动速度无关（这有时称之为摩擦第三定律）。库伦曾经考虑过摩擦可能是由于表面间分子的粘附作用，但后来他放弃了这种见解，因为果若如此则摩擦应与滑动物体的面积成比例，而实际发现则是与它无关的。他把摩擦作用归结为表面不平的交锁，并总的表示为将负荷举起通过不平面的顶峰所作的功。看来库伦对这理论有某些保留，而且好象当时科学院也并不准备左袒其成员所提出的各个无理意见，因为库伦曾写道：

我并不过分强调那理论。它似乎很容易地用来解释摩擦的所有现象，但是科学院今天只要求实用的研究，因而过分地相信一种思想是危险的。这种见解或者能够影响我们去描述那些有待解释的经验。

近代有关摩擦作用的重要实验研究，特别是用极薄的烃化合物膜所润滑的固体静摩擦是由威廉·哈迪爵士 (Sir William Hardy) 所完成的。特别是，哈迪指出了润滑剂的单分子层（边界层）所起的重要作用。这一附着在表面上并定向了的单分子层对摩擦有着深远的影响。他自己的实验是很巧妙和简单的，同时他强调应用近代物理和化学的概念与方法来研究这些表面现象的必要性。在促进本课题的发展现代化上，哈迪的研究贡献要比别人多。

本书将描述固体表面在接触和滑动中所发生的物理和化学过程的实验研究，以及对摩擦作用和边界润滑作用的机理研究。要提出的第一个问题是，放置在一起的固体之间的真实接触面积是什么，实验表明，甚至极仔细地制备的表面皆具有比分子尺寸大得多的凹凸部分。固体是支承在这些不平处的最高点的顶尖上的，因此，紧密接触的面积是很小的。事实上真实接触面积几乎与表面的大小无关，而是决定于负荷，因为在强大压力之下局部接触点发生了塑性变形和流动，直至面积大到足以支承负荷为止。

滑动时所有摩擦发生于这很小的面积上，所以可以预期在这些摩擦接触点上的表面温度会达到一个很高的值。曾用各种实验方法来研究这一问题，结果表明即使在中等的滑动速度下金属表面温度也确实高的，并且很容易使接触点上的金属热软化或局部熔融。在非导体上，这种局部高温甚至更容易产生，这种局部性的软化或熔融在抛光加工和一些物理过程中都起着重要的作用。

第三个要提出的问题是关于表面损坏的本质。已经知道在金属的接触点上同时存在着真正的粘附和熔焊。摩擦力主要就是剪切这些结点所需的力。这些观测说明了摩擦的经典定律，因为形成结点的那部分面积几乎和滑动表面的表观面积无关，而与施加的负荷成正比。当表面不动或在低速下滑动时，在接触区内的强大压力引起了这种“冷熔焊”，而在较高速度下这种过程被金属的高温软化或熔融所促进。金属结点的剪切、变形、和铲除构成金属的物理磨损，本书对产生磨损的这些原因进行了研究。软金属薄层涂于较硬的金属上可有效地降低摩擦，本书对它在轴承合金上所能起的作用也进行了讨论。

金属表面间的相互作用和其接触紧密程度会因气体或氧化物吸附膜的存在而有很大的变化，在这方面曾作了些研究。研究表明，洁净金属表面间的摩擦和粘附作用是很大的。本书还简单地叙述了一些非金属固体的摩擦行为，但由于实验基础不足，显然在这方面还需要做更多的工作。

此后，我们考察润滑表面。通常，工程师们致力于实现流体润滑。在流体润滑中表面被一层相当厚的润滑剂膜所隔开，摩擦阻力主要决定于液体的流体动力性质。流体动力或流体润滑的基础于 1886 年奥·雷诺氏 (Osborne Reynolds) 所做的先导工作之后，已经完全确立。然而在许多工作条件下不可能保持流体润滑，而表面仅仅被可能为分子一般大小的边界层所隔开。我们在此所考虑的正是在这种情况下的润滑作用。我们着重考虑了用长链分子构成的边界膜所润滑的金属表面的一般性状。看来早期所公认的关于润滑作用是由于物理吸附的定向单分子层的相互滑动的观点是过于简单化了。使用放射性金属和其他灵敏的物理方法进行研究，结果