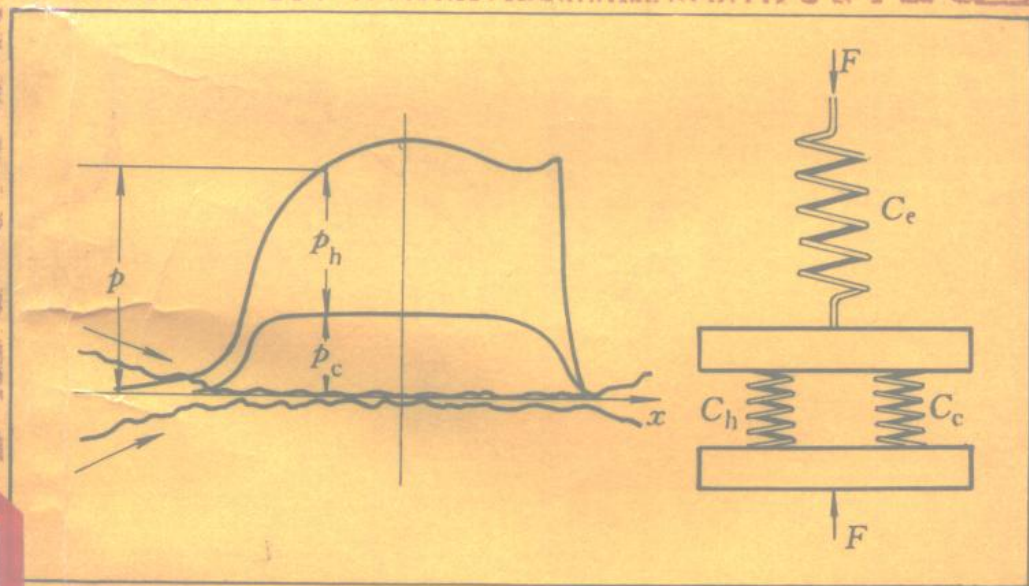


# 摩擦学原理

郑林庆



高等教育出版社

# 摩擦学原理

郑 林 庆

高等教育出版社

(京) 112号

## 内 容 简 介

本书是作者对摩擦学这一交叉学科综合研究的总结。全书按摩擦状态转化过程分别阐述了润滑力学、摩擦化学和材料磨损等方面的基本原理。共分十章：流体动力润滑、数值解算方法、润滑油的流变性质、表面形貌的摩擦学效应、粗糙表面的接触、边界润滑原理、润滑状态转化过程、材料的磨损、材料的表面强化、摩擦学试验研究。

本书是一本摩擦学方面的专著，也可以作为机械学研究生的教材，高等理工院校有关专业师生的教学参考书，以及从事机械设计和研究的工程技术人员参考。

本书责任编辑 李吉蓉

## 摩 擦 学 原 理

高等教育出版社出版

新华书店总店北京发行所发行

中国航天工业总公司科技信息研究所印刷厂印装

开本850×1168 1/32 印张14.875 插页 字数370 000

1994年11月第1版 1994年11月第1次印刷

印数0001—1200

ISBN7-04-004915-5/TH·367

定价17.85元

## 前 言

1983和1984年作者先后在昆明、贵阳和重庆讲学，写了《摩擦学原理》和《摩擦学》两本讲义。原打算在此基础上，结合近年来科研小组的研究成果和本学科的新发展加以扩充和修订，写一本较系统的书。几年来由于各种原因，直至退休之后才有条件集中时间着手编写。

摩擦学是门新兴的技术科学，学科体系还未臻成熟。学者们见仁见智，完全可以按各自的观点撰写不同风格的著作。本书基本上是沿着摩擦状态转化过程这条线索组织编写的。从流体动力润滑开始，简单介绍有关数值解算方法之后，讨论了润滑油的流变性质、表面形貌的摩擦学效应和粗糙表面接触三个问题。接着使用较多的篇幅阐述边界润滑原理。鉴于当前机械学界从事摩擦学工作的不少同志希望对润滑化学和摩擦化学有较深入的了解，作者充实了这方面的内容，为下面章节铺垫基础。润滑状态的转化过程是本书的主要章节，着重分析了部分流体润滑和混合润滑的特征，包括：粗糙表面的形貌效应、热效应和微弹流效应，载荷分配的弹性谐调关系，乏油、干涸和油膜破裂等。随后写了材料磨损和表面改性措施。最后以摩擦学实验研究作结束。作者认为，利用摩擦状态转化过程为主线可以将大部分摩擦学基本原理连贯起来。本书写成之后，仍感调理锤炼不够，内容和结构显得零乱。限于作者的学识和水平，缺点、疏漏和错误在所难免，希望读者多提宝贵意见。

全书内容主要包括了作者从事摩擦学教学与研究以来积累的学术资料，以及科研小组和培养研究生的研究成果。朱东、吴承伟和胡元中三位教授花费不少时间和精力将他们攻读学位以来的

大量文献资料整理出来供作者参考。天津大学邱宣怀教授、清华大学吴宗泽教授和刘家潜教授对本书作了认真仔细的审订。很多同行专家对各有关部分提出了宝贵意见。作者深表感谢。

本书编写还得到中国科学院兰州化学物理研究所固体润滑开放研究实验室的资助，特此致谢。

郑林庆

1993年12月

# 目 录

## 绪 论

0.1 摩擦学的历史沿革 .....	1
0.2 摩擦学的研究范围 .....	2
0.3 摩擦学研究的系统分析 .....	3
0.4 摩擦学研究的黑匣方法 .....	3
参考文献 .....	6

## 第一章 流体动力润滑

1.1 润滑油的粘度 .....	7
1.1.1 动力粘度 .....	7
1.1.2 Hagen-Poiseuille 定律 .....	9
1.1.3 油的运动粘度 .....	11
1.1.4 粘温效应 .....	12
1.1.5 粘压效应 .....	12
1.2 Reynolds方程 .....	13
1.3 接触弹性变形及油膜几何方程 .....	18
1.4 Reynolds方程的边界条件 .....	22
1.5 能量方程 .....	23
1.6 流体润滑理论的应用 .....	26
1.6.1 单油楔径向滑动轴承的流体动力润滑分析 .....	26
1.6.2 刚体线接触摩擦副建立流体动力油膜可能性论证 .....	31
1.7 弹性流体动力润滑 .....	35
1.8 Грубин理论 .....	36
1.9 线接触等温弹流理论 .....	40
1.10 润滑区域图 .....	44

1.11 点接触等温弹流理论 .....	46
1.12 热弹流润滑理论 .....	49
参考文献 .....	57

## 第二章 数值解算方法

2.1 Reynolds 方程的求解 .....	62
2.1.1 Reynolds 方程的有限差分法 .....	62
2.1.2 边界条件的处理 .....	66
2.1.3 Reynolds 方程的有限元解法 .....	68
2.2 弹性变形的计算方法 .....	75
2.3 能量方程与热传导方程的求解 .....	81
2.4 非线性问题 .....	86
2.5 全膜流体润滑数值解的一般步骤 .....	88
参考文献 .....	89

## 第三章 润滑油的流变性质

3.1 流变性质的一般规律 .....	91
3.2 弹流摩擦 .....	94
3.3 高压下润滑油的流变性质 .....	96
3.3.1 低滑率摩擦 .....	99
3.3.2 高滑率摩擦 .....	100
3.3.3 “旋-滚”点接触试验机 .....	102
3.4 流变动力润滑 .....	103
3.5 润滑脂的流变性质简介 .....	107
3.6 应用例题 .....	109
参考文献 .....	116

## 第四章 表面形貌的摩擦学效应

4.1 表层与油膜 .....	119
4.2 一维形貌参数 .....	123

4.3 轮廓高度分布函数及概率密度函数 .....	125
4.4 波峰、波谷、斜率和曲率 .....	129
4.5 二维形貌 .....	131
4.6 功率谱密度 .....	134
4.7 三维形貌 .....	138
4.8 应用实例 .....	140
4.8.1 塑性指数 $\psi$ .....	140
4.8.2 W曲线的应用 .....	141
4.8.3 表面模型参数 $\gamma$ 的应用 .....	144
4.9 三维形貌的润滑效应 .....	146
4.10 相关分析与谱分析的应用 .....	151
参考文献 .....	158

## 第五章 粗糙表面的接触

5.1 有规则的粗糙平面的弹性接触 .....	162
5.1.1 一维余弦波粗糙表面 .....	162
5.1.2 二维余弦波粗糙表面 .....	166
5.2 随机粗糙平面的弹性接触 .....	168
5.2.1 Greenwood和Williamson 模型 .....	168
5.2.2 Whitehouse和Archard 模型 .....	171
5.2.3 Nayak 模型 .....	174
5.3 随机粗糙曲面的弹性接触及两个随机粗糙面的接触 .....	181
5.3.1 随机粗糙曲面的弹性接触 .....	181
5.3.2 两个随机粗糙表面的弹性接触 .....	184
5.4 粗糙表面的塑性接触 .....	187
5.4.1 理想塑性接触 .....	187
5.4.2 粗糙表面的塑性接触实验 .....	188
5.5 粗糙表面接触塑性流动的判据 .....	190
5.5.1 经典的塑性流动判据 .....	190
5.5.2 粗糙面塑性接触的判据——塑性指数 .....	192
参考文献 .....	197



## 第六章 边界润滑

6.1 化学反应的基本原理 .....	200
6.1.1 化学反应速度 .....	201
6.1.2 浓度对反应速度的影响——动力学方程式 .....	203
6.1.2.1 基元反应的动力学方程式 .....	203
6.1.2.2 反应的级数 .....	204
6.1.3 温度对反应速度的影响——活化能 .....	205
6.1.3.1 Arrhenius 经验公式(阿氏公式) .....	205
6.1.3.2 活化能 .....	207
6.1.3.3 温度效应类型 .....	208
6.1.4 催化作用 .....	209
6.2 摩擦化学简介 .....	211
6.2.1 变形 .....	211
6.2.2 断裂 .....	213
6.2.3 固体的机械活化 .....	214
6.2.4 活化能和表面能 .....	215
6.2.5 摩擦化学反应动力学的一般过程 .....	216
6.3 润滑剂 .....	220
6.3.1 润滑油的组成 .....	220
6.3.2 润滑脂 .....	222
6.3.3 固体润滑剂和自润滑作用 .....	223
6.3.4 常用的润滑油(脂)添加剂 .....	227
6.4 油性添加剂的作用 .....	230
6.4.1 表面能和润湿现象 .....	230
6.4.2 物理吸附和化学吸附 .....	232
6.5 极压添加剂的作用 .....	236
6.5.1 活性硫化物 .....	236
6.5.2 有机磷化物 .....	237
6.5.3 二烷基二硫代磷酸锌 .....	238
6.5.4 卤系极压剂 .....	240

6.5.5	二烷基二硫代磷酸硫化氧钼 .....	241
6.6	添加剂的复合效应 .....	242
6.6.1	油性剂和极压剂的复合 .....	242
6.6.2	氧化的抑制磨损作用 .....	243
6.6.3	添加剂的协同效应 .....	244
6.6.4	复合化合膜 .....	244
6.6.5	氮的增效作用 .....	245
6.6.6	润滑油添加剂的复合使用 .....	245
6.6.7	润滑脂用的极压添加剂 .....	246
	参考文献 .....	247

## 第七章 润滑状态转化过程

7.1	吸附膜的破裂 .....	252
7.1.1	热源 .....	252
7.1.2	瞬时温升 .....	253
7.1.2.1	固定热源 .....	253
7.1.2.2	移动热源 .....	255
7.1.2.3	线接触的表面瞬现温升 .....	257
7.1.2.4	点接触的表面瞬现温升 .....	259
7.2	油膜吸附热 .....	261
7.2.1	油膜吸附热方程 .....	261
7.2.2	吸附膜解吸临界温度方程 .....	264
7.2.3	Akin 解吸临界温度方程 .....	266
7.2.4	油膜破裂 .....	269
7.3	干摩擦理论 .....	270
7.3.1	简单的粘着摩擦理论 .....	271
7.3.2	修正粘着理论 .....	272
7.3.3	具有沾污膜的金属粘着理论 .....	274
7.3.4	犁沟效应 .....	276
7.4	粗糙面接触的润滑理论 .....	277
7.4.1	具有 Reynolds 粗糙度摩擦副的润滑 .....	222

7.4.2	Christensen 随机模型 .....	278
7.4.3	平均流量模型 .....	280
7.4.4	粗糙面接触的变形型式 .....	285
7.5	部分流体动力润滑理论 .....	287
7.5.1	部分弹性流体动力润滑理论 .....	288
7.5.2	面接触油润滑摩擦副的部分流体润滑理论 .....	293
7.5.3	热效应 .....	295
7.5.4	微弹流效应 .....	297
7.6	混合润滑的研究 .....	298
7.6.1	混合润滑平均油膜厚度 .....	298
7.6.2	载荷分配 .....	300
7.6.3	混合润滑的摩擦系数 .....	302
7.6.4	混合润滑对胶合的影响 .....	308
7.6.5	乏油与干涸 .....	309
7.6.6	三维真实粗糙表面弹性接触的算例 .....	309
	参考文献 .....	313

## 第八章 材料的磨损

8.1	材料的基本磨损型式 .....	317
8.1.1	疲劳磨损 .....	317
8.1.2	粘着磨损 .....	322
8.1.3	磨料磨损 .....	328
8.1.3.1	磨料磨损的类型 .....	328
8.1.3.2	磨屑的形成 .....	329
8.1.3.3	磨料磨损的模型 .....	331
8.1.4	腐蚀磨损 .....	334
8.1.4.1	氧化磨损 .....	335
8.1.4.2	氢致磨损 .....	337
8.1.4.3	其它介质腐蚀磨损 .....	338
8.2	磨损的转化与复合 .....	338
8.2.1	冲蚀(erosion)磨损 .....	339

8.2.2	磨损型式的转化 .....	340
8.2.3	边界润滑磨损(boundary lubricated wear) .....	341
8.2.4	微动磨损(fretting wear) .....	342
8.2.4.1	粘着的作用 .....	343
8.2.4.2	磨屑的作用 .....	344
8.2.4.3	脱层的作用 .....	346
8.2.4.4	氧化的作用 .....	346
8.2.4.5	微动疲劳 .....	347
8.3	聚合物的摩擦与磨损 .....	347
8.3.1	塑料的主要摩擦学行为 .....	348
8.3.2	聚四氟乙烯分子结构特点 .....	349
8.3.3	聚四氟乙烯的摩擦机理 .....	350
8.3.4	塑料的磨损 .....	351
8.3.4.1	蠕变磨损 .....	352
8.3.4.2	老化磨损 .....	352
8.3.5	银纹理论 .....	353
8.3.6	塑料的润滑 .....	354
8.4	陶瓷及金属陶瓷的摩擦与磨损 .....	355
8.4.1	陶瓷摩擦材料的种类与应用 .....	356
8.4.2	陶瓷摩擦副的润滑 .....	359
8.4.3	陶瓷的摩擦学行为 .....	360
参考文献	.....	364

## 第九章 材料表面的强化

9.1	摩擦学复合材料 .....	367
9.1.1	自润滑复合材料 .....	367
9.1.2	耐磨复合材料 .....	368
9.2	表面强化 .....	371
9.2.1	加工硬化 .....	371
9.2.2	表面淬火 .....	372
9.2.2.1	表面淬火的原理 .....	372

9.2.2.2	表面淬火方法及其应用	374
9.2.3	化学热处理	376
9.2.3.1	化学热处理过程	376
9.2.3.2	扩渗方法	380
9.2.3.3	金属扩渗	381
9.2.3.4	非金属扩渗	383
9.2.3.5	化学热处理的应用实例	384
9.2.4	表面冶金强化	386
9.2.4.1	表面涂层	386
9.2.4.2	其它表面冶金强化处理	388
9.3	表面薄膜强化	389
9.3.1	化学和电化学强化	390
9.3.1.1	电镀	390
9.3.1.2	化学镀	391
9.3.1.3	复合镀	391
9.3.1.4	刷镀	392
9.3.1.5	转化处理	392
9.3.2	气相沉积 (vapor deposition)	393
9.3.2.1	真空蒸发	393
9.3.2.2	离子镀	394
9.3.2.3	溅射镀膜	394
9.3.2.4	化学气相沉积	396
9.3.2.5	气相沉积的应用	397
9.3.3	离子注入 (ion implantation)	399
9.4	表面改性工程的展望	400
	参考文献	402

## 第十章 摩擦学试验研究

10.1	摩擦磨损试验装置	403
10.1.1	四球机	403
10.1.2	环块磨损试验机	407

10.1.3	双盘接触疲劳试验机 .....	409
10.1.4	销盘式摩擦磨损试验机 .....	410
10.1.5	多品种联合摩擦磨损试验机 .....	411
10.2	摩擦学物理量的测量 .....	413
10.2.1	摩擦力的测量 .....	413
10.2.2	磨损量的测量 .....	415
10.2.3	表面温度的测量 .....	416
10.2.4	油膜厚度的测量 .....	419
10.3	铁谱技术和表面形貌测量 .....	427
10.3.1	铁谱技术(ferrography) .....	427
10.3.2	谱片的观测分析 .....	429
10.3.3	接触式表面形貌仪 .....	431
10.3.3.1	模拟计算表面形貌仪 .....	431
10.3.3.2	数字计算表面形貌仪 .....	432
10.3.4	超精表面形貌仪 .....	433
10.4	表面分析技术 .....	435
10.4.1	显微镜分析技术 .....	435
10.4.2	微探针分析技术 .....	439
10.4.2.1	波谱和能谱分析技术 .....	439
10.4.2.2	Auger (俄歇) 电子能谱分析技术 .....	441
10.4.2.3	光电子能谱化学分析技术 .....	443
10.5	摩擦学研究的层次 .....	444
10.5.1	工程实验 .....	444
10.5.2	摩擦学研究模型的层次 .....	447
10.5.3	分子-原子级摩擦学研究的进展情况 .....	448
10.5.3.1	接触与粘着 .....	449
10.5.3.2	界面切变与摩擦 .....	451
10.5.3.3	界面流变学 .....	455
	参考文献 .....	456

# 绪 论

摩擦学是一门研究表面摩擦行为的技术科学。人们如果能严格控制摩擦能耗，防止、控制或转变危害性磨损，将已有摩擦学知识运用于生产，无疑会获得惊人的经济效益。先进工业国家都很重视摩擦学的研究、发展和应用<sup>[1]</sup>。

## 0.1 摩擦学的历史沿革

人类对摩擦现象早有认识，并能用来为自己服务。史前已知钻木取火。中国约在公元前2600年就有车的出现（《古史考》）。《诗经》“邶风·泉水”篇有“载脂载鞶，还车言迈”的诗句，当时应用动物脂肪润滑已经相当普遍。我国应用矿物油润滑剂的记载见于公元3世纪前后，西汉张华《博物志》中提到酒泉延寿和高奴有石油，并用于“膏车及水碓甚佳”<sup>[2]</sup>。

对摩擦学研究的较早科学家当推Leonardo da Vinci(1452~1519)，他第一个对摩擦提出科学的论断，认识到摩擦力与载荷成正比而与名义接触面积无关。1785年C. A. Coulomb继前人的研究，用机械啮合概念解释干摩擦，提出摩擦理论。后来有人提出分子吸引理论和静电力学理论。1935年F. P. Bowden开始用材料粘着概念研究干摩擦，1950年提出粘着理论。关于润滑的研究，1886年Osborne Reynolds根据Beauchamp Tower实验观察到的流体动力润滑现象，建立了流体动力润滑基本方程式。至于线、点接触的弹性流体动力润滑的计算，到电子计算机应用之后才得到较快的发展和推广。润滑化学和材料磨损的研究开展较晚，本世纪60年代以来陆续研制出各种表面分析仪器才推动这些研究迅速发展。摩擦化学诞生对边界润滑问题的深入研究创造了

条件。这样，就初步具备综合研究摩擦、润滑、磨损相互关系的条件，逐渐形成摩擦学这门边缘学科。时至今日，这门学科仍然处在发展之中，随着科学技术的发展，研究工作势必由宏观进入微观、静态进入动态、定性进入定量，并更多地进行系统综合研究。

## 0.2 摩擦学的研究范围

摩擦学的研究范围很广，诸如：（1）动、静摩擦副，如滑动轴承、啮合传动、螺纹联接、电器触头、磁带录音头等；（2）零件表面受工作介质摩擦或碰撞、冲击，如犁铧、水轮机叶轮、血管中血液流动等；（3）机械制造工艺的摩擦学问题，如金属成形、机械加工、微细加工工艺等；（4）弹性体摩擦副，如汽车轮胎与路面的摩擦、弹性密封的动力渗漏等；（5）苛峻工况条件的摩擦学问题，如宇宙探索遇到的高真空、低温度、离子辐射等，深海作业中高压、腐蚀、润滑剂稀释、防漏密封等；（6）地质学中地壳移动现象，如火山爆发、地震以及山、海、断层形成等；（7）生物摩擦学，如研究海豚皮肤结构改造舰只船体设计，研究人体关节润滑机理诊治风湿性关节炎，研究人工心脏瓣膜的耐磨寿命设计等；（8）生活中音乐、体育等方面都有摩擦学问题。

这门边缘科学所涉及的基础学科很多。以机械工程中油润滑金属摩擦副为例，滑动轴承处于完全流体润滑状态时，基本可以运用流体力学单一学科的理论来解算。但是齿轮传动和滚动轴承这类点、线接触摩擦副，在计算它的流体动力承载时，就需要考虑接触变形和高压下润滑油粘度变化的影响。在计算摩擦阻力时，则需要考虑油的流变特性，一般不能把它简化成Newton型流体，甚至要考虑瞬时变化过程的效应。如果油膜厚度接近于表面粗糙度，就需要考虑表面纹理对润滑油流动的阻遏和疏导作用，以及



油温所引起的热效应。油膜更薄时，两摩擦表面的粗糙峰顶将发生接触或碰撞，接触区处于边界润滑状态。这时在自然环境下，表面会形成沾污膜或氧化膜；若油中含有油性添加剂就可以形成吸附膜，若含极压剂就可以形成化学反应膜。各种摩擦状态、各种表面的生成与破裂，都与磨损发生和发展有密切的关系。想深入了解磨损发生、发展的机理，寻找各种磨损类型相互转化以及复合的错综关系，则需要对表面的磨损全过程进行系统和微观研究。

### 0.3 摩擦学研究的系统分析

分析问题，应把它作为整体系统来研究，不宜孤立割裂。摩擦学行为的系统分析，以剖析油润滑齿轮传动较为典型。

各种齿轮传动的摩擦状态可以差别很大。有的传动是按全膜润滑进行设计的，例如平面双包络蜗杆传动的润滑设计就是企图获得最佳的流体动力润滑状态。也有的齿轮传动是在无油条件下工作，啮合全过程处于干摩擦状态。大多数齿轮传动则在混合润滑状态下工作，至少在启动或停车过程一般很少会全油膜啮合。混合润滑可以是接近全膜润滑，也可以是接近边界润滑；在啮合过程中，润滑状态可能在全膜到混合润滑，甚至到干涸润滑之间来回变化。混合润滑的一个重要问题是分析载荷的分配。摩擦副上总载荷在油膜动力承载和峰顶接触承载之间的分配，需要根据弹性谐调原理来确定各自的分量。

峰点接触边界润滑的摩擦学行为，情况比较复杂。运用黑匣方法作系统分析会对问题看得清晰，层次分明。

### 0.4 摩擦学研究的黑匣方法<sup>[3, 4]</sup>

齿轮传动摩擦学行为高度概括简化，其功能基本是把输入功能变换为技术上有用的输出。输入和输出在功能上的因果关系是