

主 编 单 位

中国机械工程学会设备维修专业学会

《机修手册》第3版编委会

主 任 (兼主编) 郑国伟
顾 问 陈凤才 潘大连
副主任 (兼副主编) 吴关昌 高克勤 文德邦 冯永亨 (常务)
委 员 (按姓氏笔划为序) 马福安 陈长雄 李炳禄 何家森
林亨耀 姚家瑞 唐经武 童义求 喻明受

第 8 卷 编 委 会

主 任 (兼主编) 林亨耀 汪德涛
副主任 (兼副主编) 陈苑棣 王家强
委 员 (按姓氏笔划为序) 朱均 伦祖舜 李文哲
张祥梅 陈家靖 林心勇 林南通 梁锐广

《机修手册》第3版编辑组

冯永亨 温莉芳 (以下按姓氏笔划为序) 冯宗青 孙本绪
吴柏青 何富源 贺麓盒 徐 彤 熊万武

第 3 版 前 言

《机修手册》第 2 版（即修订第一版）各篇陆续出版后，深受读者欢迎，曾多次重印。近 10 年来，随着科学技术的飞速发展，维修技术的不断提高，以及各项标准的更新，《机修手册》第 2 版已不能适应机修行业的需求，为此，我们组织出版第 3 版，以满足广大读者的需要。

本次修订，我们主要做了如下补充和调整：

（1）调整手册结构 我们根据需要与可能，对一些设备类型进行了补充和调整，以求做到门类齐全，重点突出，内容充实。将第 2 版的 7 篇调整为 8 卷，即第 1 卷：设备修理设计；第 2 卷：修理技术基础；第 3 卷：金属切削机床修理；第 4 卷：铸锻设备与工业炉修理；第 5 卷：动力设备修理；第 6 卷：电气设备修理；第 7 卷：通用设备与工业仪表修理；第 8 卷：设备润滑。

（2）增加先进设备的维修技术 近年来，我国工业企业的生产装备水平有了较大的提高，精密、大型、自动化、机电一体化先进设备日益增多。掌握这类设备的维修技术，是提高我国机修行业技术水平的关键。我们在有关卷内分别增加了这类设备的维修技术。

（3）重点补充设备改造技术 我国企业生产设备日益老化，更新资金不足，因此，对老旧设备进行技术改造已成为提高我国设备水平的重要途径。为此，我们重点补充了利用新技术改造老旧设备的经验。

（4）增加了设备诊断技术 设备诊断技术是在设备运行中或基本不拆卸设备的情况下，掌握设备运行状况，预测故障的部位和原因的新技术，本次修订新增了这部分内容。

（5）采用了最新标准 从第 2 版出版以来，机电标准大部分进行了修订，并制订了不少新标准，本次修订采用了最新标准。

在本次修订中，编者进行了广泛的调查研究，收集了大量的资料，认真研究了读者意见，力求使内容的广度和深度都有一个新的提高。由于水平所限，本手册中错误和不足之处在所难免，恳请读者予以指正。

在本次修订中，北京、上海、辽宁、吉林、四川、广东等省市的中国机械工程学会设备维修专业学会和各卷主编所在单位，如北京汽车工业联合公司、第一汽车制造厂、上海机床厂、沈阳重型机器厂、第二重型机器厂、机械电子工业部广州机床研究所等给予了大力支持，长期关注本手册编写出版工作的老一辈专家和领导给予了热情的指导，一些未参加本次修订工作的原编者也提出了宝贵意见。在此，我们一并表示感谢。

《机修手册》第 3 版编委会

本卷修订说明

为了做好这次修订工作，广东省和陕西省机械工程学会设备维修专业委员会共同组成“机修手册第3版第8卷编委会”，以集中各方面力量，对上一版进行全面的修订，力求修订后的第8卷能为设备润滑人员提供既先进又实用的参考资料。

本卷的修订是以“修订一版”的第七篇为基础进行的。在继承原有优点的前提下，作了如下主要修改与补充：

- 1) 增加了固体润滑材料、金属压力成形加工用油、新型添加剂、铁谱监测与诊断技术等新的章节。
- 2) 润滑油脂均按新标准作了修改和补充。
- 3) 参照国内外的先进技术，对典型零部件和设备的润滑以及其他章节作了重点补充。
- 4) 书末增加了名词术语、国内外润滑油脂对照、常用基础资料等。

在本次修订工作中，初稿完成后，先由两省的编委分别审查修改，然后由编委会集中审查（颜志光同志对合成润滑油脂部分进行了审查），最后由汪德涛同志汇总整理。尽管本手册经过多次修订才定稿，但不足之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

本次修订工作，得到了广东省机械工业厅、广州机床研究所、广州重型机器厂、华南理工大学、茂名石油化学工业公司南海高级润滑油公司、一坪化工厂、惠安化工厂、陕西重型机器厂、西安交通大学、西安重型机械研究所、西安仪表厂、西安东风仪表厂的大力支持，特此表示感谢。

《机修手册》第3版第8卷编委会

《机修手册》卷目

<p>第1卷 设备修理设计</p>	<p>上册：第1篇 基础资料 第2篇 机械零件 下册：第3篇 机械传动</p>
<p>第2卷 修理技术基础</p>	<p>第1篇 零件修复和强化技术 第2篇 设备诊断技术 第3篇 微电子技术</p>
<p>第3卷 金属切削 机床修理</p>	<p>上册：第1篇 机床通用修理技术 第2篇 普通机床的修理 下册：第3篇 普通齿轮加工机床的修理 第4篇 精密及大(重)型机床的修理 第5篇 机床改装</p>
<p>第4卷 铸锻设备与 工业炉修理</p>	<p>第1篇 铸造设备的修理 第2篇 锻压设备的修理 第3篇 工业炉的修理</p>
<p>第5卷 动力设备修理</p>	<p>第1篇 工业锅炉房设备的修理 第2篇 制氧站设备的修理 第3篇 煤气站设备的修理 第4篇 乙炔站设备的修理 第5篇 空气压缩机的修理 第6篇 工业管道的修理</p>
<p>第6卷 电气设备修理</p>	<p>第1篇 电气设备修理的常用技术资料 第2篇 电机及低压电器的修理 第3篇 机床电气设备的修理 第4篇 常用成套电气设备的修理</p>
<p>第7卷 通用设备与 工业仪表修理</p>	<p>第1篇 运输机械的修理 第2篇 辅助设备的修理 第3篇 工业仪表的修理</p>
<p>第8卷 设备润滑</p>	<p>第1篇 摩擦、磨损与润滑 第2篇 润滑材料 第3篇 润滑技术及管理</p>

目 录

第 1 篇 摩擦、磨损与润滑

第 1 章 摩擦与磨损

第 1 节 固体的表面性质与接触	1-1
(一) 表面形貌	1-1
(二) 表面接触的物理与化学特性	1-3
(三) 固体表面的接触	1-4
1. 表面接触力学	1-4
2. 表面接触面积	1-5
第 2 节 摩擦	1-5
(一) 摩擦的类型	1-6
1. 按摩擦副的运动形式分类	1-6
2. 按摩擦副的运动状态分类	1-8
3. 按摩擦副表面的润滑状况分类	1-8
4. 外摩擦与内摩擦	1-9
(二) 摩擦的机理	1-9
1. 机械理论	1-9
2. 粘附理论	1-9
3. “犁沟”作用	1-11
4. 分子-机械理论	1-12
5. 其他理论	1-13
(三) 滚动摩擦	1-13
1. 滚动摩擦系数	1-13
2. 自由滚动	1-14
3. 同时承受切向牵引力的滚动	1-15
4. 在槽形滚道中滚动	1-16
5. 沿曲线滚道滚动	1-16
6. 车辆转弯	1-16
第 3 节 磨损	1-17
(一) 磨损的定义	1-17
(二) 磨损的类型	1-17
1. 磨损的过程	1-17
2. 磨损的类型	1-18
(三) 磨损的机理	1-19
1. 粘附磨损	1-19
2. 磨料磨损	1-20

3. 表面疲劳磨损	1-22
4. 剥层磨损	1-23
5. 腐蚀磨损	1-25
6. 微动磨损	1-25
7. 其他磨损	1-26
(四) 磨损形式的转化	1-26
(五) 解决摩擦学问题的一般方法	1-27
参考文献	1-28

第 2 章 润滑理论基础

第 1 节 润滑的作用和类型	2-1
(一) 润滑的作用	2-1
(二) 润滑的类型	2-1
第 2 节 流体动压润滑	2-2
(一) 流体动压润滑的特性	2-2
1. 流体的粘度	2-2
2. 楔形润滑膜	2-3
(二) 雷诺方程	2-4
1. 假设	2-5
2. 雷诺方程的推导	2-5
3. 雷诺方程的应用	2-8
4. 雷诺方程的简化	2-8
5. 压力分布的边界条件	2-10
(三) 紊流和流态转变	2-11
1. 紊流现象	2-11
2. 由层流到紊流的流态转变	2-11
第 3 节 流体静压润滑	2-12
(一) 流体静压润滑系统的基本类型	2-12
1. 定压供油系统	2-12
2. 定量供油系统	2-12
(二) 流体静压润滑油膜压力的形成	2-12
(三) 因压力降而产生的粘性流体的 缝隙流动	2-14
1. 两平行平板	2-14
2. 环形缝隙	2-15

3. 矩形平面油垫	2-16	1. 物理吸附	2-27
4. 圆形油腔平面油垫	2-16	2. 化学吸附	2-27
5. 环形油腔平面油垫	2-16	3. 化学反应	2-27
(四) 流体静压润滑常用计算公式	2-17	(五) 影响边界膜润滑性能的因素	2-28
1. 空载流量计算公式	2-17	(六) 提高边界膜润滑性能的方法	2-29
2. 节流比和设计参数计算公式	2-17	(七) “爬行”现象	2-30
3. 液阻计算公式	2-17	1. “爬行”的机理	2-30
第4节 流体动静压润滑	2-18	2. 消除“爬行”的方法	2-33
(一) 概述	2-18	第8节 润滑脂润滑	2-33
(二) 流体动静压润滑系统的基本类型	2-18	(一) 概述	2-33
第5节 弹性流体动压润滑	2-18	(二) 润滑脂的流变性能	2-33
(一) 弹性流体动压润滑的基本方程	2-19	第9节 摩擦学系统概念及应用	2-34
1. 艾特尔-格鲁宾近似解	2-19	(一) 摩擦学系统的基本概念	2-34
2. 线接触弹流的数值解法	2-21	1. 一般考虑	2-34
3. 点接触弹流的膜厚计算公式	2-22	2. 系统的技术功能	2-35
(二) 弹流润滑理论的应用	2-23	3. 工作变量	2-35
第6节 气体润滑	2-24	4. 系统的结构	2-36
(一) 概述	2-24	5. 摩擦学特性	2-36
(二) 气体润滑的基础理论	2-24	(二) 系统分析在摩擦学中的应用	2-37
第7节 边界润滑	2-25	1. 系统的综合特性	2-37
(一) 边界润滑的特点	2-25	2. 选择润滑剂的系统化程序	2-38
(二) 边界润滑的机理	2-26	3. 系统的工况监测技术	2-39
(三) 边界润滑剂的性能	2-26	参考文献	2-44
(四) 形成边界膜的物理-化学过程	2-27		

第2篇 润 滑 材 料

第3章 润滑油脂

第1节 润滑油	3-1	4. 极压抗磨剂	3-9
(一) 润滑油的制备过程	3-1	5. 油性剂和摩擦改进剂	3-10
1. 原油的分类和组成	3-1	6. 粘度指数改进剂	3-10
2. 常减压蒸馏	3-3	7. 防锈剂	3-10
3. 溶剂精制	3-4	8. 降凝剂	3-10
4. 溶剂脱蜡	3-4	9. 抗泡沫剂	3-11
5. 丙烷脱沥青	3-5	(三) 润滑油的分类	3-11
6. 白土精制	3-5	(四) 润滑油的主要品种及应用范围	3-11
7. 润滑油加氢	3-5	1. 内燃机油	3-11
8. 润滑油品种的开发	3-6	2. 齿轮油	3-24
9. 润滑油产品调合	3-6	3. 液压油	3-32
(二) 润滑油添加剂	3-8	4. 压缩机油	3-41
1. 清净分散剂	3-8	5. 冷冻机油	3-46
2. 抗氧抗腐剂	3-9	6. 汽轮机油	3-49
3. 金属钝化剂	3-9	7. 全损耗系统用油	3-50
		8. 电器用油	3-53

9. 其它专用润滑油	3-59
第2节 润滑脂	3-63
(一) 润滑脂的组成及结构	3-63
1. 稠化剂	3-63
2. 润滑脂的基础油	3-64
3. 润滑脂的添加剂	3-65
4. 润滑脂的结构	3-67
(二) 润滑脂的生产过程	3-67
(三) 润滑脂的分类、分组、命名及代号	3-70
1. 润滑脂的分类	3-70
2. 润滑脂的分组、命名和代号	3-72
(四) 润滑脂的主要品种及适用范围	3-73
1. 钙基润滑脂	3-73
2. 钠基润滑脂	3-74
3. 铝基润滑脂	3-77
4. 锂基润滑脂	3-77
5. 钡基润滑脂	3-80
6. 混合基润滑脂	3-80
7. 复合皂基润滑脂	3-81
8. 膨润土润滑脂	3-83
9. 烃基润滑脂	3-83
第3节 合成润滑油	3-85
(一) 合成润滑油	3-85
1. 合成润滑油的特性	3-85
2. 合成润滑油的应用	3-86
(二) 合成润滑脂	3-90
1. 合成润滑脂的特性	3-90
2. 合成润滑脂的应用	3-90

第4章 固体润滑

第1节 概述	4-1
第2节 固体润滑剂的种类和使用方法	4-1
1. 固体润滑剂的种类	4-1
2. 固体润滑剂的使用方法	4-1
第3节 几种常用的固体润滑剂	4-2
(一) 二硫化钼	4-2
1. 二硫化钼的润滑机理	4-2
2. 二硫化钼的主要性能	4-3
(二) 石墨	4-4
(三) 氟化石墨	4-5
(四) 氮化硼	4-5

(五) 聚四氟乙烯	4-6
(六) 尼龙	4-7
第4节 固体润滑涂层	4-8
(一) 环氧涂层	4-8
1. HNT抗摩涂层基本组分	4-8
2. 固化剂用量计算	4-10
3. 环氧抗摩涂层的主要性能	4-11
(二) 聚酯涂层导轨	4-11
1. 聚酯涂层的基本组分和固化反应过程	4-11
2. JKC型抗摩涂层材料的工艺特性	4-12
(三) 含氟涂层导轨	4-13
第5节 金属塑料复合导轨板	4-14
第6节 塑料导轨软带	4-16
第7节 机床塑料导轨的应用工艺	4-19
(一) 导轨板的应用工艺	4-19
(二) 导轨软带的应用工艺	4-20
(三) 导轨涂层的涂敷工艺	4-21
(四) 导轨涂层的压注成形工艺	4-23
第8节 高分子复合材料	4-23
第9节 固体润滑膜	4-26
(一) 固体润滑膜的特征	4-26
(二) 固体润滑膜的摩擦磨损性能	4-27
(三) 影响固体润滑膜润滑特性的因素	4-27
(四) 固体润滑膜的制备方法	4-28
第10节 添加固体润滑剂的油脂	4-29
参考文献	4-31

第5章 工艺润滑材料

第1节 切(磨)削液	5-1
(一) 切(磨)削液的作用与性能	5-1
1. 冷却作用	5-1
2. 润滑作用	5-2
3. 清洗作用	5-3
4. 防锈作用	5-3
5. 切削液的性能	5-4
(二) 切(磨)削液的分类和组成	5-4
1. 油基切削液的分类	5-4
2. 油基切削液的组成	5-5
3. 水基切削液的分类	5-5
4. 水基切削液的组成	5-6

X

(八) 皂分	6-25
(九) 腐蚀	6-26
(十) 氧化安定性	6-26
(十一) 蒸发损失	6-26
(十二) 胶体安定性	6-27
(十三) 相似粘度	6-27
(十四) 强度极限	6-28
(十五) 机械安定性	6-28
(十六) 水淋性	6-29
(十七) 低温转矩	6-29
第3节 润滑油的仪器分析	6-29
(一) 红外吸收光谱法	6-30
(二) 原子发射光谱法	6-31

(三) 原子吸收光谱法	6-32
(四) 质谱分析法	6-33
(五) 核磁共振波谱法	6-33
(六) X射线荧光分析法	6-34
第4节 润滑剂摩擦磨损性能及模拟台架试验	6-35
(一) 概述	6-35
(二) 润滑剂摩擦、磨损特性的测定方法简介	6-35
(三) 润滑剂摩擦、磨损特性的数值表示方法	6-36
(四) 常用的几种试验机	6-36
参考文献	6-38

第3篇 润滑技术及管理

第7章 设备的润滑方法和润滑装置

第1节 设备对润滑系统的要求和润滑方法的分类	7-1
(一) 设备对润滑系统的要求	7-1
(二) 润滑系统和方法的分类	7-1
1. 润滑系统和方法的分类	7-1
2. 集中润滑系统的类型	7-4
3. 润滑系统的选择原则	7-5
第2节 润滑装置与润滑系统	7-5
(一) 润滑油(稀油)润滑与润滑系统	7-5
1. 常用的润滑装置和方法	7-5
2. 润滑油(稀油)润滑系统	7-20
3. 润滑油(稀油)集中润滑系统设计任务和步骤	7-21
4. 油雾润滑系统的设计	7-43
5. 润滑油的过滤净化和污染控制	7-47
6. 润滑系统的参数测量、监测及报警装置	7-60
(二) 润滑脂(干油)润滑与润滑系统	7-61
1. 脂杯、脂枪润滑	7-61
2. 润滑脂(干油)集中润滑与润滑系统	7-64
第3节 设备润滑系统常见故障的检修	7-112

(一) 润滑系统故障的一般原因	7-112
1. 机械设计制造方面的原因	7-112
2. 设备保养维修方面的原因	7-112
(二) 加油元件、润滑装置及润滑系统常见故障的检修	7-113
1. 加油元件常见故障的检修	7-113
2. 润滑装置常见故障的检修	7-113
3. 润滑系统常见故障的检修	7-118
(三) 设备润滑控制与监测装置常见故障及其检修	7-119
1. 流量监控装置	7-120
2. 压力监控装置	7-122
3. 温度监控装置	7-122
参考文献	7-122

第8章 典型机械零部件的润滑

第1节 齿轮传动的润滑	8-1
(一) 序言	8-1
1. 齿轮的分类	8-1
2. 齿轮的损坏类型与润滑的关系	8-1
(二) 闭式齿轮传动润滑的特点和作用	8-2
(三) 选择齿轮润滑油的几种典型方法	8-3
1. AGMA标准规范“工业闭式齿轮传动的润滑”	8-3
2. 我国专业标准ZBJ17003-89	

“工业齿轮润滑油选用方法”	8-3	5. 选择滑动轴承润滑油的几种典型方法	8-34
3. 按德国标准DIN51509第1部分“齿轮润滑油的选择”	8-12	6. 滑动轴承润滑方式的选择和供油量控制	8-41
4. ISO/TC28/SC4/WG 1“关于工业齿轮油的系列品种及性能要求”的标准提案	8-13	7. 滑动轴承润滑脂的选用	8-43
5. 经验公式和图	8-14	(三) 液体静压轴承的润滑	8-45
6. 日本常用选油图表	8-14	1. 静压轴承与动压轴承的差别	8-45
7. 利用弹性流体动压润滑理论来选择闭式齿轮传动润滑油的最佳粘度	8-18	2. 静压轴承润滑最佳润滑油粘度的计算	8-45
8. 按速度选用油品粘度	8-19	3. 静压轴承对润滑油的要求	8-47
9. 根据齿轮分度圆速度和载荷系数来确定油品粘度	8-20	4. 静压轴承对润滑油的选用	8-47
10. 选择齿轮润滑油的各种方法的比较	8-20	5. 液体静压轴承的装配、调试中常见的失效问题及消除方法	8-47
(四) 齿轮润滑方式的选择和供油量控制	8-21	第3节 滚动轴承的润滑	8-47
1. 油池浸浴法	8-21	(一) 序言	8-47
2. 循环压力喷油法	8-22	(二) 选择滚动轴承润滑油的几种典型方法	8-53
(五) 蜗杆副的润滑		(三) 滚动轴承选用润滑脂应考虑的因素	8-59
1. 三种常用蜗杆副类型及其润滑特点	8-22	(四) 如何选用滚动轴承润滑脂	8-62
2. 蜗轮润滑剂的作用及其特性	8-22	(五) 各类设备滚动轴承用脂的选择实例	8-64
3. 选择蜗杆副润滑油的几种典型方法	8-23	(六) 弹性流体动压润滑理论在滚动轴承润滑实践中的应用例子	8-64
4. 蜗杆副润滑方式的选择和供油量控制	8-23	第4节 导轨的润滑	8-66
(六) 开式齿轮传动的润滑	8-25	(一) 序言	8-66
1. 开式齿轮传动润滑的特点和对其润滑剂性能的要求	8-25	(二) 导轨工作的特点	8-66
2. 美国齿轮制造商协会AGMA推荐的开式齿轮油有关表格	8-26	(三) 导轨润滑剂的作用	8-66
3. 日本润滑学会推荐的开式齿轮及蜗轮传动润滑油粘度表	8-26	(四) 导轨的磨损与失效	8-66
第2节 滑动轴承的润滑	8-27	(五) 机床导轨润滑状态分析	8-67
(一) 滑动轴承分类的一般知识	8-27	1. 机床的爬行问题	8-68
(二) 动压滑动轴承的润滑	8-29	2. 导轨润滑油的防爬性能	8-70
1. 单油楔、双油楔、多油楔动压轴承的概念与实际应用	8-29	(六) 机床导轨润滑油的正确选择	8-72
2. 滑动轴承润滑剂的选择	8-31	(七) 液体静压润滑导轨	8-77
3. 在选择滑动轴承润滑油时应考虑的主要因素	8-31	(八) 机床导轨润滑方法的选择	8-78
4. 径向轴承的设计界限	8-33	(九) 滑动导轨润滑油槽的形式和尺寸	8-78
		(十) 导轨的防护装置	8-81
		(十一) 机床导轨的维护保养	8-83
		第5节 液压传动的润滑	8-83
		(一) 绪言	8-83
		(二) 怎样正确选择与合理使用液压油	8-83
		1. 正确选择液压油的依据	8-83
		2. 合理使用液压油的要点	8-87

(三) 液压设备用油代用的原则、程序
与注意事项.....8-88

1. 选用国产代用液压油的原则8-88

2. 液压设备选用液压油程序及
注意事项8-88

(四) 液压传动的应用及其选用油实例.....8-88

(五) 液压油的使用与维护管理.....8-98

第6节 螺旋副的润滑.....8-100

(一) 螺纹连接的润滑8-100

(二) 回转变位及微调用螺旋副的润滑8-101

(三) 机床螺旋传动的润滑8-101

第7节 钢丝绳的润滑.....8-102

(一) 钢丝绳的缠绕、磨损8-102

(二) 钢丝绳的润滑8-102

第8节 链条的润滑.....8-105

(一) 链条的类型8-105

(二) 链传动装置的摩擦与磨损8-105

(三) 传动链对润滑剂的要求和选用8-106

(四) 链条润滑方法的选择8-107

第9节 离合器、联轴器和无级变速
器的润滑.....8-107

(一) 离合器的润滑8-107

(二) 联轴器的润滑8-107

(三) 机械无级变速器的润滑8-107

参考文献.....8-109

第9章 典型设备的润滑

第1节 金属切削机床的润滑.....9-1

(一) 典型金属切削机床的润滑9-1

1. 普通车床的润滑.....9-1

2. 自动车床的润滑.....9-1

3. 立式车床的润滑.....9-2

4. 钻床及攻螺纹机床的润滑.....9-2

5. 磨床的润滑.....9-2

6. 龙门刨床的润滑.....9-3

7. 数控机床的润滑.....9-3

8. 电火花加工机床用介电油品.....9-3

(二) 金属切削机床润滑剂的选用9-4

第2节 锻压设备的润滑.....9-5

(一) 机械压力机的润滑9-5

1. 润滑方式.....9-5

2. 润滑材料选用.....9-6

3. 机械压力机主要摩擦副的润滑.....9-7

(二) 螺旋压力机的润滑.....9-11

1. 螺杆的润滑9-12

2. 导轨的润滑9-12

3. 摩擦轮轴承的润滑9-12

4. 气缸的润滑9-12

5. 拨杆轴承的润滑9-12

(三) 锻锤的润滑.....9-12

1. 蒸汽—空气锤、无砧座锤的
润滑9-13

2. 空气锤的润滑9-14

(四) 液压机的润滑.....9-17

1. 水压机泵、阀元件和水压缸的
润滑9-17

2. 导轨的润滑9-18

第3节 气体压缩机的润滑9-18

(一) 概述.....9-18

(二) 气体压缩机的润滑方式及特点.....9-19

1. 活塞式气体压缩机的润滑9-19

2. 膜片式压缩机的润滑9-21

3. 滑片式压缩机的润滑9-22

4. 螺杆式压缩机的润滑9-22

5. 涡轮式压缩机的润滑9-23

(三) 润滑剂的选择.....9-24

1. 不同的压缩气体决定了对润滑
剂类型的选择9-24

2. 润滑油粘度的选择9-25

3. 油品的代用9-25

(四) 气体压缩机润滑系统的使用及
维护.....9-26

1. 注意保持润滑油液的清洁9-26

2. 应定期检查9-26

3. 应注意压缩机的工作状态9-26

4. 注意保持润滑系统中的油温9-26

第4节 冷冻机的润滑9-26

(一) 概述.....9-26

(二) 冷冻机润滑的特点.....9-26

1. 活塞式冷冻机9-26

2. 螺杆式冷冻机9-28

3. 离心式冷冻机9-29

(三) 冷冻机润滑系统的故障及维护.....9-29

(四) 冷冻机润滑油的选用.....9-30

第5节 起重运输机械的润滑9-30

(一) 概述.....9-30

(二) 起重运输机械润滑点的分布	9-30	1. 汽油机润滑油的选择	9-52
(三) 起重运输机械典型零部件的润滑	9-31	2. 柴油机润滑油的选择	9-52
1. 钢丝绳的润滑	9-31	(五) 润滑系统使用注意事项	9-53
2. 减速器的润滑	9-31	第8节 注塑机的润滑	9-54
3. 开式齿轮的润滑	9-31	(一) 手动或半自动塑料注射成型机的润滑	9-54
4. 齿轮联轴器、滚动轴承、卷筒内齿盘以及滑动轴承的润滑	9-31	1. 齿轮变速箱的润滑	9-54
5. 液压推杆与液压电磁铁的润滑	9-31	2. 注射部件的润滑	9-54
(四) 起重运输机械润滑注意事项	9-31	3. 锁模部分的润滑	9-54
(五) 起重运输机械常用润滑材料	9-32	4. 机座部分的润滑	9-54
(六) 典型起重运输机械的润滑	9-32	(二) 自动液压注塑机的润滑	9-54
第6节 轧钢机的润滑	9-32	1. 注射部分的润滑	9-54
(一) 轧钢机对润滑的要求	9-32	2. 移模部件的润滑	9-54
1. 轧钢机	9-32	3. 电动机的润滑	9-54
2. 轧钢机对润滑的要求	9-32	参考文献	9-54
3. 轧钢机典型部位润滑形式的选择	9-33	第10章 密封与治漏技术	
(二) 轧钢机润滑采用的润滑油、脂	9-33	第1节 常见泄漏原因及其治理方法	10-1
1. 轧钢机采用的润滑油、脂	9-33	(一) 概述	10-1
2. 轧钢机工艺润滑冷却常用介质	9-33	(二) 泄漏原因	10-1
(三) 轧钢机常用润滑系统简介	9-35	(三) 治理泄漏的方法	10-2
1. 稀油和干油集中润滑系统	9-35	第2节 密封装置	10-2
2. 轧钢机工艺润滑系统	9-35	(一) 密封装置的作用和种类	10-2
3. 轧钢机油膜轴承润滑系统	9-37	(二) 密封装置的选用方法	10-5
4. 轧钢机油雾润滑和油气润滑系统	9-37	(三) 橡胶密封件	10-5
(四) 轧钢机常用润滑装置设备	9-43	1. 挤压型密封圈	10-5
(五) 轧钢机常用润滑设备的安装维修	9-46	2. 径向唇形密封圈	10-6
1. 设备的安装	9-46	3. 旋转轴唇形密封圈	10-7
2. 设备的清洗、试压、调试	9-46	4. 橡胶密封件材料的选用	10-9
3. 设备维修	9-46	5. 橡胶密封件的寿命及其失效原因	10-11
第7节 移动发动机组的润滑	9-49	(四) 其他密封装置	10-11
(一) 内燃机润滑的特征与要求	9-49	1. 软填料密封	10-11
1. 内燃机的润滑特征	9-49	2. 毡圈密封	10-14
2. 轴承合金的摩擦特性	9-50	3. 密封垫片	10-14
3. 内燃机对润滑油的要求	9-50	4. 迷宫密封	10-16
(二) 活塞环、气缸及曲轴轴承的润滑	9-51	5. 磁流体密封	10-17
1. 活塞环和气缸的润滑	9-51	(五) 机械密封	10-18
2. 曲轴轴承的润滑	9-51	1. 机械密封装置的结构、原理和分类	10-18
(三) 内燃机润滑系统	9-51	2. 机械密封的优缺点	10-20
(四) 内燃机润滑油的选择	9-52	3. 机械密封的选型方法	10-20

附 录

附录 1 设备润滑技术常用名词术语、 图形符号、技术量和单位

- (一) 设备润滑常用名词术语附1-1
 (二) 集中润滑系统图形符号.....附1-15

附录 2 国内外润滑油品对照

(一) 典型机械零部件或设备用油品

- 对照附2-2
1. 国内外工业齿轮油对照.....附2-2
 2. 国内外开式齿轮油对照.....附2-2
 3. 国内外导轨油和导轨-液压油对照附2-2
 4. 国内外液压油对照.....附2-2
 5. 国内外主轴油对照.....附2-2
 6. 国内外汽轮机油对照.....附2-2
 7. 国内外冷冻机油对照附2-15
 8. 国内外压缩机油对照附2-15
- (二) 汽车、拖拉机用油对照.....附2-16
1. 国内外柴油机油对照附2-16
 2. 国内外汽油机油对照附2-16
 3. 国内外车辆齿轮油对照附2-16
 4. 国内外液力传动油和刹车液对照附2-16
- (三) 润滑脂对照.....附2-16
1. 国内外一般工业润滑脂对照附2-16
 2. 国内外高级工业润滑脂对照附2-16
 3. 国内外车辆润滑脂对照附2-16
- (四) 国内外金属切削油(液)对照.....附2-27
1. GB7631.5-89金属加工油(液)
标准附2-27
 2. 金属加工用油(液)使用场合附2-27
 3. 国外主要油品公司油基切削液
产品对照附2-27
 4. 国外主要油品公司水基切削液产品

- 对照附2-27
5. 压力成形加工用油(液)部分产品附2-27

附录 3 设备润滑常用资料

(一) 润滑剂分类附3-1

1. 润滑剂和有关产品(L类)的分类.....附3-1
2. API内燃机油用途分类.....附3-1
3. 石油添加剂分类.....附3-1

(二) 润滑油粘度及其换算附3-9

1. 工业用润滑油粘度分类.....附3-9
2. 车辆用润滑油粘度分类.....附3-9
3. 各种粘度对比及相应润滑剂等级.....附3-9
4. 粘度换算附3-14
5. 粘度指数和粘温曲线图表附3-14
6. 润滑油密度与润滑脂等级及其换算
度附3-23

(三) 工艺润滑材料标准.....附3-23

1. 硫化切削油(SH0364-92)附3-23
2. 乳化油(SH0356-92)附3-23
3. 合成切削液(GB/T 6144-82)附3-26

附录 4 润滑油产品及试验方法 标准目录(摘录)

1. 石油产品综合.....附4-1
2. 润滑油类.....附4-3
3. 润滑脂类.....附4-6
4. 绝缘油.....附4-8
5. 液压油.....附4-9
6. 合成油脂.....附4-9
7. 真空油脂、防锈油脂附4-11
8. 工艺用油附4-13
9. 石油产品添加剂附4-13
10. 油品应用类.....附4-14
11. 已废止的标准.....附4-14

第1章 摩擦与磨损

汪德涛

两个相互接触的物体在外力作用下发生相对运动或具有相对运动趋势时，在接触面上发生阻碍切向相对运动的现象称为摩擦，因摩擦而产生的阻力称为摩擦力，相互摩擦的两物体称为摩擦副。摩擦过程带有复杂的物理、化学和力学等方面的综合特性。任何机器在运转中必然产生摩擦，同时机器所传递的一部分能量在克服摩擦阻力的过程中被消耗掉，并且转换为摩擦热而使零件升温，表面层产生磨损。人们在实践中认识到，为了减少摩擦阻力、能耗和磨损，降低发热，可以选用摩擦系数较小和抗磨性较好的材料，或在接触表面间使用润滑剂，或是转化两体相对运动时的摩擦形式，用滚动摩擦代替滑动摩擦等。总之，机器中一切发生相对运动的零件接触表面间都存在摩擦现象，磨损是摩擦产生的后果，而润滑则是改善摩擦状态、减少磨损的重要措施。

第1节 固体的表面性质与接触

在研究摩擦与磨损时，了解摩擦表面的特性与接触过程具有重要意义，因为摩擦、磨损与润滑过程都是在相对运动的对偶表面之间进行的。因此在研究固体的摩擦、磨损与润滑时，首先要考虑摩擦表面的宏观和微观几何特性以及接触过程的特点，包括表面接触的物理和化学特性。

(一) 表面形貌

如果从微观上对固体表面进行分析研究，则外观上光滑平整的表面，实际上是由许多不同几何形状的凸峰和凹谷所组成的。固体表面微观几何形态特别是微凸体高度的变化，称为表面形貌。微凸体是指表面上微小的不规则的凸体。微凸体的几何形态是不规则的，典型的微凸体模型常取为圆柱体、角锥体或半球形等。

形成表面形貌不平的原因很多，如在切削加工过程中形成的刀痕、磨痕，切屑分离时的塑性变形，以及由于机床-刀具-工件系统的刚度差及振动等原因而在表面上形成的形状误差、颤纹等。通常用以下三种几何特性来描述。

(1) 表面形状宏观误差 是在制造过程中形成的表面几何形状对标准形状的误差，如表面凸凹、凹入和锥度等，一般是有规则的，不重复出现，见图1-1-1曲线3。

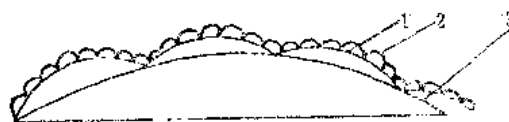


图1-1-1 固体表面形貌及特性

1—表面波纹度 2—表面粗糙度 3—表面形状宏观误差

(2) 表面波纹度 又称表面加工纹理，是指表面微观结构的主要方向。表面波纹度是在制造过程中由于机床和刀具性能不完善，如系统刚度差、振动、齿轮误差、旋转刀具不准确等所形成的表面周期性的、有规则出现的几何形状误差。一般波纹的节距为其波峰高度的40倍以上，见图1-1-1曲线1。

(3) 表面粗糙度 是指零件加工表面上具有的较小间距和峰谷所组成的微观几何形状特性。一般由所采用的加工方法和(或)其它因素形成，见图1-1-1曲线2。

为了综合评价表面粗糙度，通常取一微带以判别具有表面粗糙度特征的基准线长度(称为取样长度 l)进行测量，为了能充分合理地反映加工表面的粗糙度特性，取评定轮廓所必需的一个或几个取样长度作为评定长度 l_n 。在评定表面粗糙度时是以轮廓中线为基准线的。轮廓的最小二乘中线 m 是指具有几何轮廓形状并划分轮廓的基准线，在取样长

度内使轮廓线上各点的轮廓偏距的平方和为最小 (图1-1-2)。轮廓的算术平均中线是指具有几何轮廓形状, 在取样长度内与轮廓走向一致的基准线, 在取样长度内划分轮廓使上下两边的面积相等 (图1-1-3)。

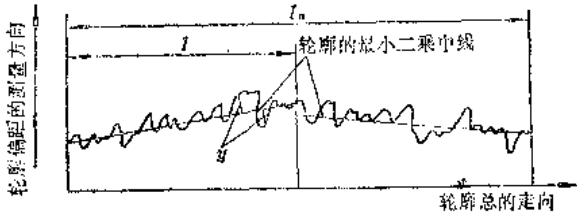


图1-1-2 轮廓的最小二乘中线

表面粗糙度可按下列表征参数之一进行评定。

(1) 轮廓算术平均偏差 R_a 。是指在取样长度 l 内轮廓偏距绝对值的算术平均值 (图1-1-4), 即

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx$$

或近似取

$$R_a \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|$$

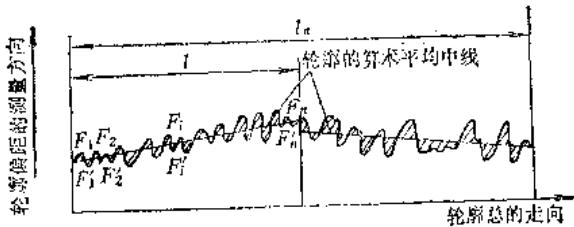


图1-1-3 轮廓的算术平均中线

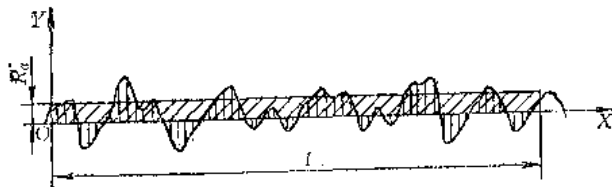


图1-1-4 轮廓算术平均偏差

(2) 微观不平度十点高度 R_z 。是指在取样长度内5个最大的轮廓峰高的平均值与5个最大的轮廓谷深的平均值之和 (图1-1-5), 即

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 y_{pi} + \sum_{i=1}^5 y_{oi}}{5}$$

式中 y_{pi} ——第 i 个最大的轮廓峰高;

y_{oi} ——第 i 个最大的轮廓谷深。

(3) 轮廓最大高度 R_v 。是指在取样长度 l 内轮廓峰顶线和轮廓谷底线之间的距离 (图1-1-6)。

除了以上参数而外, 轮廓微观不平度的平均高度和轮廓曲线峰顶圆弧平均半径等对研究对偶表面的摩擦学特性也有较重要的意义。

表面粗糙度是通用的评价表面微观几何形状的重要参数, 但它只能说明与表面垂直截面上的表面轮廓, 而无法说明表面微凸体的形状、尺寸、斜率及分布状况等。例如图1-1-7所示的各表面, 轮廓算术平均偏差虽然相同, 但却具有完全不同的轮

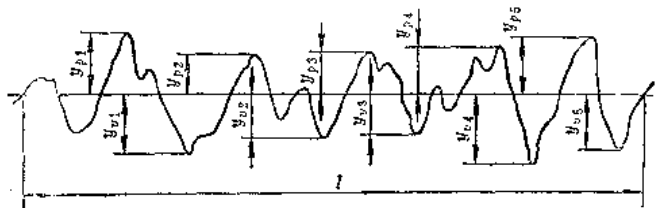


图1-1-5 微观不平度十点高度

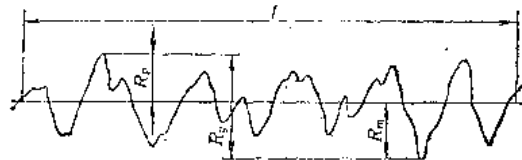


图1-1-6 轮廓最大高度

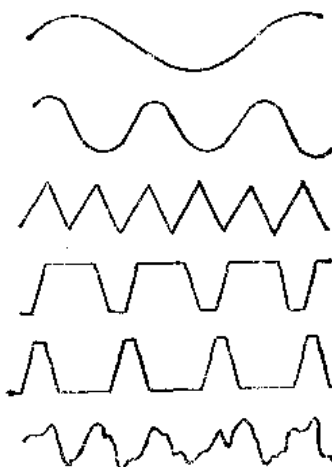


图1-1-7 具有相同轮廓算术平均偏差的不同表面

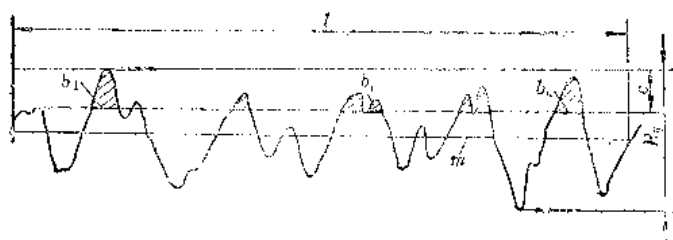


图1-1-8 轮廓支承长度率

廓。因此，要想把表面形貌描述好，还需要测量评定一些其他参数，如微凸体的形状及其分布状况等。

在取样长度 l 内，一平行于中线的线与轮廓相截所得到的各段截线长度之和，为轮廓支承长度 η_p ，与取样长度 l 之比为轮廓支承长度率 t_p 。由图 1-1-8 可知：

$$\eta_p = b_1 + \dots + b_1 + \dots + b_1$$

$$t_p = \frac{\eta_p}{l}$$

轮廓支承长度率参数提供了识别不同轮廓形状的方法，可用以评定表面的耐磨性能。

(二) 表面接触的物理与化学特性

通常将固体表面看成是固体与周围介质分隔的表面。真实表面深层由不同物理特性的外表面层与内表面层所组成，引起表面层变化的过程很复杂。在粗糙的固体表面上，个别微凸体与对偶表面相互作用时周期性地承受载荷，因而周期性地产生很大的压力梯度。摩擦力所作的功转化为热量，使表层发热，有时温度达到近千摄氏度，形成温度梯度很大的温度场。当具有容易与材料起反应的环境介质时，高压和高温同时作用使摩擦体表层的几何、物理和力学性能发生较大变化，有时还有局部应力场形成。即使是性能变化不大，也会对磨损有较大影响，因为破坏是在多次作用下造成的。有关这方面的情况可以在专著中找到，此处不作详细描述。大致可概略地描述如下。

(1) 接触表面几何形状的变化 例如上面提到的表面粗糙度、波纹度以及由于接触点上存在磨料和磨屑而产生的几何形状。

(2) 晶体结构的变化 包括晶体结构缺陷的扩展，如点缺陷，线缺陷（位错），面缺陷（孪晶界、晶界、晶粒位向变化等），体缺陷（空位聚集、

形成孔隙），以及金属结构的变化，如晶格转变，碳化物的生成和溶解，相变，再结晶等。

聚合物结构的变化有：链的取向、相组成的变化，聚合物的破坏，金属聚合物化合物的生成等。

(3) 摩擦表面膜的形成 包括环境介质（气体、润滑油）吸附气体分子膜、化学吸附膜、物理吸附膜、化学反应膜和转移到对偶表面上的材料膜、选择转移的表面膜、由润滑油生成的聚合物膜等。

早在1936年，施马尔茨就对真实表面的组成进行了描述，把外表面层（即污染层与吸附层）与内表面层（即基体材料和加工硬化层）区分开来。图 1-1-9 是金属表面层组成的简图，其中外表面层是由自然污染层、吸附气体分子层和环境介质化合物层（氧化物层、硫化物层、氯化物层）所组成，主要由表面与环境间的化学反应而产生。内表面层又称次表面层，包括毕氏层、变形层和金属基体等部分所组成。毕氏层是在表面加工过程中分子层材料受热熔化并在随后冷却过程中使材料特性和组织改变而形成的，它具有细微的晶体结构，比金属基体要硬一些，耐磨性也较高。变形层是材料塑性变形而形成的硬化层。除此而外，有润滑的表面上通常还会含有一层润滑油膜，可能还有外界灰尘和磨屑在表面上存在。所谓“纯净表面”，意味着在表面上已去掉了所有污染物，如灰尘、磨屑、微量润滑油及氧化物层等化学膜，并且必须保持在超高真空状况下两个表面相互附着而避免重新污染。但是这不太容易作到，因此通常将纯净表面看成是用溶剂将

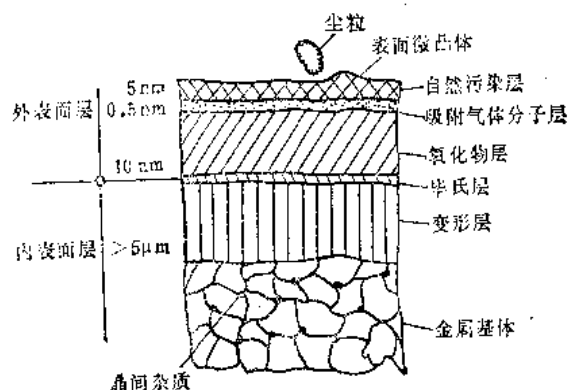


图1-1-9 金属表面层的结构

表面上的油脂、灰尘等清洗干净，却仍然保持有氧化物膜存在的表面，这时表面间的粘附作用可以忽略。

在金属表面摩擦过程中，表面层的结构特性及生成、破裂、再生的规律对其摩擦性能有很大影响。在接触形成过程中，除了弹性变形过程之外，微凸体还受到某些塑性变形。由于这种变形过程中，对偶表面间发生紧密接触，以致表面间相互作用的分子吸引力可以透过界面而起作用。这种分子力包括那些有助于固体内聚的所有类型的相互作用力，即金属的共价键和离子键力和范德华力等，将导致“界面粘接”，并产生粘附“接点”。这些都是我们在考虑表面接触的物理与化学特性时所要考虑的种种影响因素。随着近代摩擦学基础理论和微观测试分析方法的发展，将会使我们对摩擦表面接触的物理与化学过程有进一步的深入了解。

(三) 固体表面的接触

1. 表面接触力学

固体表面的接触以及相互作用过程和特性属于“接触力学”。接触力学对大多数摩擦学系统，有着十分重要的意义。早在1881年，赫兹就研究了弹性体表面在载荷作用下产生的应力和应变，提出了著名的弹性理论。下面仅对固体表面相互接触的变形过程以及接触界面机械功的转移机理的一般物理概念作一简单说明。

作为起点，首先研究在任意分布载荷 $P(x, y)$ 作用下的一个半无限长弹性体，如图1-1-10所示。在接触区 A_0 范围内进行积分，则可得载荷 F_N 为

$$F_N = \int_{A_0} P dx dy \quad (1-1-1)$$

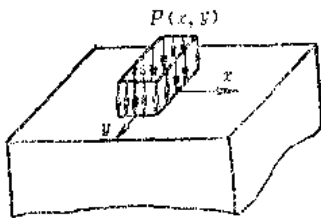


图1-1-10 作用在半无限长弹性体上的载荷分布

赫兹理论在把弹性体的接触按照弹性静态问题处理时，有如下假设：

① 材料具有完全弹性，②两个物体具有相同的弹性常数，③从表面形貌看是光滑表面，④在接触区内两个表面的曲率中心不在界面同一侧，⑤围绕接触表面公法线无“自旋”的相对角速度，⑥不传递切向力（牵引力）。尽管有这些假设，赫兹理论仍然在摩擦学中作为经典理论而得到广泛应用。下面举一些典型例子作简单说明。

对滚动轴承、齿轮、凸轮等运动副工作表面之间的弹性接触，可以用赫兹弹性接触理论加以说明。如对于钢球与钢球间的接触，在以接触区为圆的范围内任意半径 r 处的压力 P 可按式求出（见图1-1-11）：

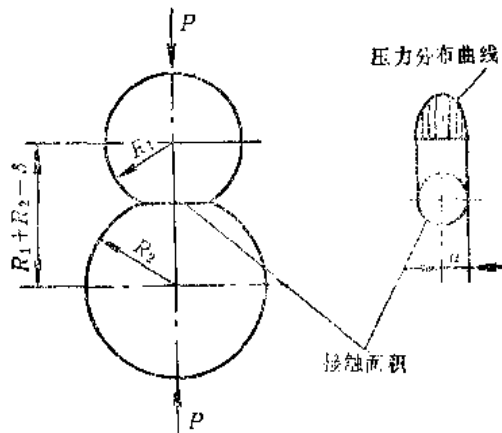


图1-1-11 两圆球接触的压力分布

$$P = \frac{3P}{2\pi a^2} \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1-1-2)$$

接触半径 a 为

$$a = \left(\frac{3PR}{4E'} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1-1-3)$$

接触面积 A_H 为

$$A_H = \pi a^2 = \pi \left[\frac{3PR}{4E'} \right]^{\frac{2}{3}} \quad (1-1-4)$$

式中 P —— 载荷；

R —— 等效曲率半径， $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ ；

R_1, R_2 —— 两圆球半径；

E' —— 综合弹性模量， $\frac{1}{E'} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} +$

$$\frac{1 - \nu_2^2}{E_2}$$

E_1, E_2 ——两钢球的弹性模量;

ν_1, ν_2 ——两钢球的泊松比。

当研究在界面法线方向上所传递的机械功时, 必须计算由于两个钢球的弹性变形而引起的它们之间的趋近量 δ :

$$\delta = \left[\frac{9P^2}{4E'^2 R} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (1-1-5)$$

由此有可能确定两个接触钢球的弹性势能 U 。

由于 $P = \frac{\partial U}{\partial \delta}$, U 可由下式表示:

$$\partial \delta = \frac{2}{3} \left[\frac{9}{4E'^2 R} \right]^{\frac{1}{3}} P^{-\frac{2}{3}} \partial P$$

$$\partial U = P \partial \delta = \frac{2}{3} \left[\frac{9}{4E'^2 R} \right]^{\frac{1}{3}} P^{\frac{2}{3}} \partial P$$

积分得

$$U = \int_0^P \frac{2}{3} \left[\frac{9}{4E'^2 R} \right]^{\frac{1}{3}} P^{\frac{2}{3}} \partial P$$

$$= \frac{2}{5} \left[\frac{9}{4E'^2 R} \right]^{\frac{1}{3}} P^{\frac{5}{3}} \quad (1-1-6)$$

对于纯弹性接触, 当不再接触时, 势能转变为动能。

如果是塑性接触, 上述赫兹弹性理论则不再适用, 可用“塑性指数” ψ 来衡量:

$$\psi = \left[\frac{E'}{H_B} \right] \left[\frac{S}{\beta} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1-1-7)$$

式中 E' —— 综合弹性模量;

H_B —— 较软材料的硬度;

S —— 表面微凸体高度的平均偏差;

β —— 微凸体的平均半径。

当 $\psi < 0.6$ 时, 则在一般实际载荷下均为弹性接触; 如果 $\psi > 1$, 则在部分接触点将为塑性接触。由于大多数表面的塑性指数均能大于 1, 故几乎在任何接触情况下均有部分微凸体产生塑性变形。

对于钢球与平面接触的情况, $R_2 = \infty, R = R_1$, 可得

$$P = \frac{3P}{2\pi a^2} \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1-1-8)$$

$$a = \left(\frac{3PR}{4E'} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1-1-9)$$

式中 R —— 钢球半径;

其余符号同前。

对于圆柱体与平面接触的情况下, $R_2 = \infty, R = R_1$, 如接触宽度为 L , 可得

$$P = \frac{2P}{\pi a L} \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1-1-10)$$

$$a = \left(\frac{4PR}{\pi L E'} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1-1-11)$$

2. 表面接触面积

在摩擦副的接触过程中, 两个对偶表面间相互作用的力发生在接触界面处, 而这些表面又总是粗糙的, 因此应注意区分以下三个名词的含意 (图 1-1-12)。

(1) 名义接触面积 又称表观接触面积, 是指由接触固体宏观界面的边界确定的接触面积。如图 1-1-12 所示, 名义接触面积 $A_0 = ab$ 。

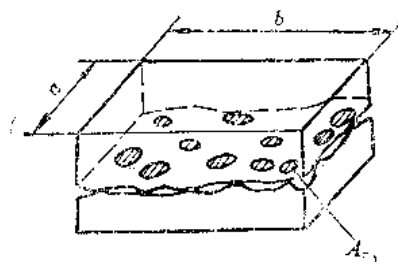


图 1-1-12 真实接触面积

(2) 真实接触面积 又称实际接触面积, 是指两接触固体间直接传递界面相互作用力的局部面积之和 (图 1-1-12)。真实接触面积 A_r 为

$$A_r = \sum_{i=1}^n A_{ri} \quad (1-1-12)$$

即真实接触面积为各微凸体处接触面积之和。显然它要比名义接触面积小得多。

(3) 轮廓接触面积 是指两接触固体的轮廓波纹形成的接触面积。

对偶表面在载荷作用下接触时, 接触点处材料将产生弹性变形和塑性变形。当两表面发生相对滑动时, 有可能发生粘附甚至咬粘, 导致机械能的散逸, 局部产生高温。当然, 实际接触情况较为复杂, 是一个仍然在探讨中的问题。

第 2 节 摩 擦

两个相互接触的物体, 在外力作用下发生相对

运动或具有相对运动趋势时，在接触面上发生阻碍切向相对运动的现象称为摩擦。

人们对摩擦规律的认识是逐步深入的。即使在目前已有经过精确分析的大量工程数据，要作精确定量的摩擦试验也是十分困难的。对摩擦定律的分析仍然不够完善。在15世纪首先由达·芬奇发现摩擦力与载荷成正比，以后由阿芒汤与库伦等人通过实验证实了一条有关滑动摩擦的定律，其内容如下：

- (1) 摩擦力与名义接触面积无关；
- (2) 摩擦力 F 与法向载荷 N 成正比，即

$$F = \mu N \quad (1-2-1)$$

式中 μ —— 摩擦系数， $\mu = F/N$ 。

摩擦力的方向总是与两接触表面相对运动方向相反。

(3) 在动摩擦的情况下摩擦力与滑动速度几乎无关。

滑动摩擦定律称为阿芒汤-库伦定律，一般适用于固体于摩擦的情况。

1704年帕朗注意到静止物体在水平面或斜面开始滑动时的摩擦力 F 与法向载荷 N 的比值为 $\tan\theta$ (这个比值即摩擦系数)，即

$$\mu = \frac{F}{N} = \tan\theta \quad (1-2-2)$$

如图1-2-1所示，可以利用使平面逐渐倾斜的

方法求出两个相互接触的物体间的摩擦系数。方法是改变 θ 角，使 θ 角逐渐增大，至物体开始在斜面上滑动时的 θ 角的正切，即为摩擦系数。

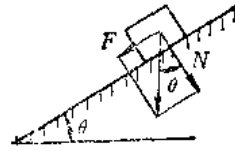


图1-2-1 用平面倾斜法测量摩擦系数

1748年欧拉再次证实了这点。

在给定的摩擦副材料及环境条件下，摩擦系数是常数。当摩擦副及环境不同时，摩擦系数也不同。如在无润滑的情况下，钢对黄铜的摩擦系数约为0.19，而在有润滑时则为0.03。由此可见摩擦系数不是材料固有的特性，而是材料和工作环境等条件综合的特性。因此在选择摩擦系数时，应考虑到摩擦副的工作条件和环境条件。表1-2-1至表1-2-3列出了常用材料的摩擦系数。

(一) 摩擦的类型

1. 按摩擦副的运动形式分类

(1) 滑动摩擦 两接触物体作相对滑动时的摩擦 (见图1-2-2)。此时在其接触面上具有不同的速度和 (或) 方向。

表1-2-1 常用材料的摩擦系数

摩擦副材料		摩擦系数		摩擦副材料		摩擦系数		
I	II	无润滑	有润滑	I	II	无润滑	有润滑	
钢	钢	0.15① 0.1	0.1~0.12② 0.05~0.1	钢	粉末冶金	0.35~0.55		
	软钢	0.2	0.1~0.2		铸铁	铸铁	0.15	0.15~0.16① 0.07~0.12
	T8钢	0.15	0.03			青铜	0.28① 0.15~0.21	0.16① 0.07~0.15
	铸铁	0.2~0.3① 0.16~0.18	0.1~0.15① 0.05~0.15			皮革	0.65① 0.28	0.15① 0.12
	黄铜	0.19	0.03	橡皮	0.8	0.5		
	青铜	0.15~0.18	0.1~0.15① 0.07	铜	T8钢	0.15	0.03	
	铝	0.17	0.02		铜	0.20		
	轴承合金	0.2	0.04	黄铜	T8钢	0.19	0.03	
	夹有胶木	0.25~0.4	0.05~0.10		淬火T8钢	0.14	0.02	
	钢纸	0.22			黄铜	0.17	0.02	
塑料		0.016~0.03	硬橡胶		0.25			
冰	0.027① 0.014		石板		0.25			
				绝缘材料	0.27			

(续)

摩擦副材料		摩擦系数		摩擦副材料		摩擦系数	
I	II	无润滑	有润滑	I	II	无润滑	有润滑
青铜	T8钢	0.16		铍铝合金	硬橡胶	0.25	
	黄铜	0.16			石板	0.26	
	青铜	0.15~0.20	0.04~0.10		铜箔	0.32	
	夹布胶木	0.23		银	银	1.5	
	报纸	0.24		镍	镍	0.7	
	硬橡皮	0.35		铂	铂	1.2~1.3	
铝	塑料	0.2		木材	铸铁或钢	0.20~0.35	0.12~0.16
	T8钢	0.18	0.03		木材	0.4~0.6 ^①	0.1 ^①
	黄铜	0.27	0.02		麻绳	0.2~0.5	0.07~0.10
	青铜	0.22			0.5~0.6 ^①	0.5	
	夹布胶木	0.26		皮革	0.4~0.5 ^①	0.03~0.05	
软木	铸铁或钢	0.30~0.50	0.15~0.25	黑色金属	毛毡	0.22	0.18
铍铝合金	夹布胶木	0.34		软钢	石棉基材料	0.25~0.40	0.08~0.12
	塑料	0.28			铜、锡、磷青铜	0.3~0.35	
					铝、银、铂、钨、镍	0.4	

注：表中滑动摩擦系数是试验数据。由于实际工作条件和试验条件不同，表中数据只能作近似计算参考。

① 静摩擦系数。

表1-2-2 密封材料的摩擦系数

材料	润滑剂 ν_{40} (mm ² /s)	18°C		100°C	
		润滑剂供给量			
		充分	欠缺	充分	欠缺
氯丁橡胶	粘度为200的减速器油，添加10%菜籽油	0.01	0.06		
脘制皮革	粘度为46的润滑油，添加有抗氧化剂	0.09	0.06	0.16	0.08
脘制皮革		0.13	0.06		
氯丁橡胶		0.02	0.07	0.12	
特种橡胶		0.03	0.06	0.16	0.17
脘制皮革	粘度为95的润滑油	0.06	0.06		
氯丁橡胶		0.01		0.15	
特种橡胶		0.02			

注：表中数据是使用摆式试验机测得，试样是密封材料与45钢套筒对磨。

表1-2-3 工程塑料的摩擦系数

下试样的塑料名称	上 试 样 (钢)		上 试 样 (塑料)	
	静摩擦系数	动摩擦系数	静摩擦系数	动摩擦系数
聚四氟乙烯	0.10	0.05	0.04	0.04
聚全氟乙丙烯	0.25	0.18		
聚偏二氟乙烯	0.33	0.25		
聚三氟氯乙烯	0.45	0.33	0.43	0.32
聚偏二氯乙烯	0.68	0.45	0.90	0.52
低密度聚乙烯	0.27	0.26	0.33	0.33
高密度聚乙烯	0.18	0.08~0.12	0.12	0.11
聚丙烯	0.14	0.13		
聚碳酸酯	0.60	0.53		
聚对苯二甲酸乙二醇酯	0.29	0.28	0.27	0.20
聚酰胺(尼龙66)	0.37	0.34	0.42	0.35
聚氯乙烯	0.45	0.40	0.50	0.40
聚己二酸己二胺	0.37	0.34	0.42	0.35
聚癸二酸癸二胺		0.39		
氯化聚醚		0.35		
苯乙烯-丁二烯-丙烯腈共聚物		0.35~0.46		

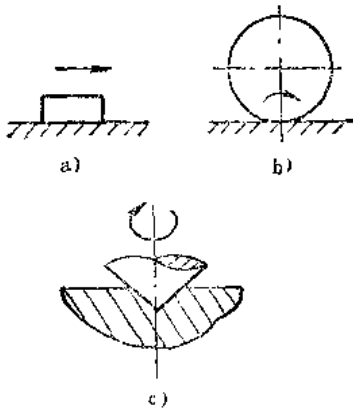


图1-2-2 摩擦形式

a) 滑动摩擦 b) 滚动摩擦 c) 自旋摩擦

(2) 滚动摩擦 两接触物体沿接触表面滚动时的摩擦。此时在其接触点处具有相同的速度和方向。

(3) 自旋摩擦 物体沿垂直于接触表面的轴线作自旋转运动时的摩擦。在分类时有时不作为单独的摩擦形式出现。

2. 按摩擦副的运动状态分类

(1) 静摩擦 当物体在外力作用下对另一物体产生微观位移(弹性和塑性变形等),但尚未发生相对运动时的摩擦。在相对运动即将开始瞬间的静摩擦为最大静摩擦,又称极限静摩擦,此时的摩

擦系数,称为静摩擦系数。

(2) 动摩擦 具有相对运动的两表面之间的摩擦。此时的摩擦系数称为动摩擦系数。

3. 按摩擦副表面的润滑状况分类

(1) 干摩擦 通常是指两物体间名义上无任何形式的润滑剂存在时的摩擦。严格说干摩擦时在接触表面上无任何其他介质如自然污染膜、凝气及润滑剂膜。

(2) 边界摩擦 作相对运动的摩擦副表面之间的摩擦磨损特性与润滑剂液体积粘度特性关系不大,而主要是由表面性质与极薄层(约为 $0.1\mu\text{m}$ 以下)的边界润滑剂性质所决定的摩擦状况。

(3) 混合摩擦 在摩擦副表面之间同时存在着干摩擦、边界摩擦和流体摩擦的混合状况下的摩擦。混合摩擦一般以半干摩擦或半流体摩擦的形式出现。

半干摩擦:在摩擦副表面上同时存在着边界摩擦和干摩擦的混合摩擦。

半流体摩擦:在摩擦副表面上同时存在着流体摩擦和边界摩擦或干摩擦的混合摩擦。

(4) 流体摩擦 摩擦副表面被一层连续的润滑剂薄膜完全隔开时的摩擦。这时流体摩擦发生在界面的润滑剂膜内,摩擦阻力由流体粘性阻力或流变阻力所决定。

4. 外摩擦与内摩擦

(1) 外摩擦 两个相互接触的物体界面之间发生的摩擦,即一般所指的摩擦。

(2) 内摩擦 同一物体内诸部分之间发生的摩擦。内摩擦一般发生在润滑剂之类的流体内,但也可能发生在固体内,如石墨、二硫化钼等固体润滑剂内。在金属的塑性加工过程中也会产生内摩擦。

(二) 摩擦的机理

尽管在古代人们已知道摩擦的存在,但很长时间内未能作出科学的解释。直至达·芬奇、阿芒汤与库伦等人开始对摩擦进行实验研究,相继有不少学者提出了不少摩擦理论,主要可归纳为摩擦的机械理论、分子理论、变形或“犁沟”理论、以及分子-机械理论等。

1. 机械理论

1508年,达·芬奇从实验证实:“材料不同,移动的难易程度也不同,这是因为各种材料摩擦不同的缘故;物体越光滑,摩擦越小”。他认为:“任何摩擦物体的摩擦阻力为其重量的 $1/4$ ”,即摩擦系数为0.25。阿芒汤在1699年、库伦在1785年先后进行了摩擦实验(图1-2-3),提出了滑动摩擦定律,把摩擦起因看成是由于表面上凹凸不平的微凸体之间互相咬合,因而产生了阻碍两接触固体滑动的阻力。即摩擦的“凹凸说”或“机械理论”。由于当时历史条件的限制,这种理论只能近似地反映外摩擦的基本规律,还不能完全符合实际情况,如把摩擦系数认为是材料的固有性能,把摩擦力看成与接触面积和速度的大小无关等。实际上当速度较大时,摩擦力与速度的大小有关;而对于洁净的光滑

表面,接触表面的分子吸引力较强,摩擦力则又与真实接触面积有关。

1737年法国数学家贝里多提出用一组半球状微凸体来表示粗糙表面的摩擦模型。从几何图形可计算出摩擦系数约为 $1/3$ 。但在当时只能以物体作为刚体来处理,而没有考虑到物体的弹性与塑性变形,因此计算的准确度很低。

2. 粘附理论

(1) 简单的粘附理论 在机械理论发展的同时,1724年法国学者德萨吉利埃指出,在两个滑动物体接触时的粘附力是摩擦阻力的主要因素。以后普朗德、汤姆林森、杰利雅金、霍姆、鲍登、泰伯、阿恰尔德等人用粘附理论或分子理论来解释摩擦起因。汤姆林森认为摩擦是由于对偶表面的分子被迫进入彼此的原子力场而后又被分开所消耗的能量所引起的。他假定法向载荷与切向摩擦力与相互作用的原子数为线性关系,但由于欠缺对表面变形与分子间力的更详细的了解,而未能将此现象量化。鲍登与泰伯根据接触表面只在微凸体相互作用点接触,导致在微小区域内产生极高应力和局部塑性变形这一认识,提出对粘附理论的看法,但直到1950、1964年才在专著中建立起较完整的粘附理论,概述如下:

当金属表面在法向载荷作用下相互压紧时,滑动表面的微凸体顶端接触,由于实际接触面积很小,可以认为接触着的微凸体上的压力很高,将产生弹性变形和塑性变形,导致实际接触面积增大,直至此面积恰好能够支承载荷时为止。在这种情况下,对理想的弹塑性材料可得(图1-2-4)

$$N_1 = A_r \sigma_{1y} \quad (1-2-3)$$

式中 N_1 ——法向载荷;

A_r ——真实接触面积;

σ_{1y} ——压缩屈服极限。

在摩擦时,在两物体接触的区域会发生牢固的粘附连接,生成结点,甚至在结点处还可能发生瞬时高温,引起“冷焊”。当两物体在切向力作用下相对移动时,结点又将被剪切断而发生“滑移”,摩擦过程就是粘附与滑移交替进行的跃动式过程,当摩擦速度增加时,跃动过程变得不明显,摩擦力就等于各个结点的连接被剪断时所需剪切力的总和,通常称为剪切项,它是构成摩擦力的主要部分,由此可得

$$F_f = S + F_s = A_r \tau_0 + F_v \quad (1-2-4)$$

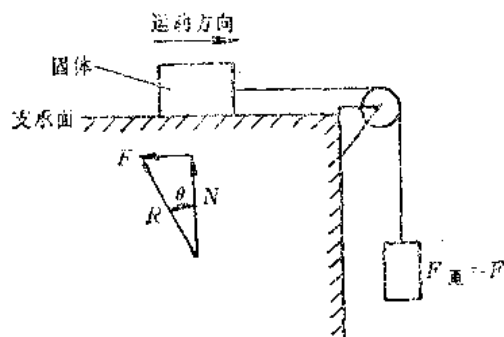


图1-2-3 摩擦试验

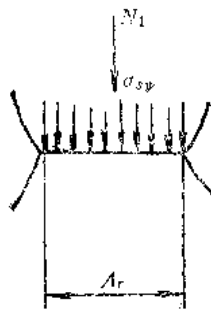
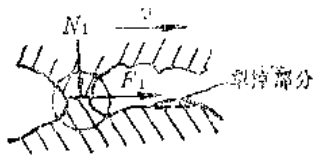


图1-2-4 单个微凸体表面接触

式中 F_1 —— 摩擦力;

S —— 剪切力;

τ_0 —— 较软金属的剪切强度极限;

P_e —— 较硬金属表面微凸体对较软金属表面的“犁耕”力, 是由于表面粗糙而增加的摩擦力。

鲍登与泰伯认为在大多数情况下, 不太粗糙而又未进行润滑的金属表面, P_e 较小, 因此可以略去不计, 由此

$$F_1 = A_r \tau_0 = \frac{N_1}{\sigma_{sy}} \tau_0 \quad (1-2-5)$$

$$\text{摩擦系数 } \mu = \frac{F_1}{N_1} = \tau_0 / \sigma_{sy} \quad (1-2-6)$$

由简单粘附理论也可以对滑动摩擦理论进行解释, 即①摩擦力与法向载荷成正比; ②摩擦力与表观接触面积无关。

对于大多数金属, 剪切强度与压缩屈服极限的比值是一个常数, 由上面的分析表明, 为什么大量金属对偶表面的力学性能(如硬度)的变化较大, 而摩擦系数的变化却较小。两种硬金属摩擦接触时, 硬金属的 σ_{sy} 大, A_r 小, 而 τ_0 大; 而软金属摩擦接触时 σ_{sy} 与 τ_0 较小, 而 A_r 则较大。为了得到较低摩擦系数, 可在硬金属基材上涂覆一层较软的金属。这时承载能力与压缩屈服极限和硬基材接近, 而在软金属镀层处发生剪切, 因此剪切应力与软金属接近, 摩擦系数较低。

对于大多数金属, τ_0 约为 σ_{sy} 的 1/5, 即摩擦

系数 μ 约为 0.2。但实际上许多金属对偶表面在空气中的摩擦系数大于 0.5, 在高真空环境中纯净表面接触摩擦时, 摩擦系数也要大得多, 因此以后鲍登与泰伯又提出了更切合实际的修正的粘附理论。

(2) 修正的粘附理论 简单粘附理论是以真实接触面积取决于法向载荷以及较软金属的压缩屈服极限为前提的, 微凸体腹部产生塑性变形及简单剪切, 没有考虑到受切向力作用后结点上所发生的现象。这对于静态接触, 大致是正确的, 但金属在高真空条件下粘附不受氧化膜或其他污染物影响, 而摩擦力很大这一事实表明, 真实接触面积比简单粘附理论所指出的大得多。在摩擦副滑动时, 由于物体同时受切向力作用, 则接触点发生屈服是在法向载荷与剪切力联合作用下产生的(图1-2-5), 这时屈服极限是由法向载荷所引起的法向应力 σ_x 与由剪切力所引起的切应力 τ 所合成的应力。按照材料力学中求二维应力的莫尔圆作图法类似的方法求解最大切应力, 最大切应力就是圆的半径, 因此

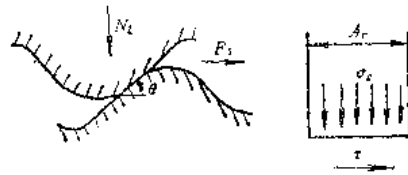


图1-2-5 二维应力的联合作用

$$\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + \tau^2 = R^2 \quad (1-2-7)$$

三维情况下尚无精确解, 但可假定为下式:

$$\sigma_x^2 + a\tau^2 = k^2 \quad (1-2-8)$$

式中, a 与 k 为待定常数, 由此

$$\left(\frac{N_1}{A_r}\right)^2 + a\left(\frac{F_1}{A_r}\right)^2 = k^2 \quad (1-2-9)$$

式中, A_r 为结点的真实接触面积, 当 $\tau = 0$ 时, 结点上的合成应力为 σ_{sy} , 可得

$$\sigma_{sy} = k$$

式(1-2-8)可写成

$$\sigma_x^2 + a\tau^2 = \sigma_{sy}^2 \quad (1-2-10)$$

当摩擦力 F 增至很大数值时, 粘附结点继续增大, 直至 N_1/A_r 与 F_1/A_r 相比很小, 可以略去, 可得

$$a\tau^2 = \sigma_{sy}^2 \quad (1-2-11)$$

在这种情况下 $\tau \approx \tau_0$, 可得

$$a\tau_0^2 = \sigma_{sy}^2 \quad (1-2-12)$$

所以

$$\alpha = \frac{\sigma_{sv}^2}{\tau_b^2}$$

因为 $\sigma_{sv} \approx 5\tau_b$, 所以 $\alpha \approx 25$ 。但由实验证实, α 应小于 25, 鲍登与泰伯假定 α 为 9。由式 (1-2-9)、(1-2-10) 两式可得

$$A_r^2 = \left(\frac{N_1}{\sigma_{sv}} \right)^2 + \alpha \left(\frac{F_1}{\sigma_{sv}} \right)^2 \quad (1-2-13)$$

式中 F_1 ——摩擦力;

$\frac{N_1}{\sigma_{sv}}$ ——简单粘附理论中推导出的真实接触面积;

$\alpha \left(\frac{F_1}{\sigma_{sv}} \right)^2$ ——摩擦力 (或剪切力) 所引起的接触面积增加。

由上面讨论可见到, 纯净金属表面 (即在高真空中的金属) 在摩擦时可能产生较大幅度的结点增长, 导致出现较大的摩擦系数, 这已由实验证实。在普通大气中的金属表面被氧化膜或其他自然污染膜覆盖, 可用上述理论解释其摩擦现象。

(3) 有自然污染膜的金属粘附理论 考察一下在法向载荷 N_1 和逐渐增加的剪切力 F_1 作用下微凸体的粘附结点。假定结点处有薄层自然污染膜, 其剪切强度极限为 τ_f , 而且 $\tau_f = c\tau_b$, 其中 τ_b 是基体金属的剪切强度极限, c 是小于 1 的常数。象上述未受污染金属那样, 当 $F_1/A_r < \tau_f$ 时, 粘附结点增长, 接触面积增加; 当 $F_1/A_r = \tau_f$ 时, 则自然污染膜被剪切断, 粘附结点停止增长, 摩擦副发生滑动。

摩擦副发生滑动的条件为

$$\sigma_s^2 + \alpha\tau_f^2 = \sigma_{sv}^2 \quad (1-2-14)$$

将式 (1-2-12) 代入上式可得

$$\sigma_s^2 + \alpha\tau_f^2 = \alpha\tau_b^2$$

$$\text{或} \quad \sigma_s^2 + \alpha\tau_f^2 = \frac{\alpha}{c^2}\tau_b^2$$

$$\text{因此} \quad \frac{\tau_f}{\sigma_s} = \left[\frac{c}{\alpha(1-c^2)} \right]^{1/2}$$

摩擦系数

$$\mu_1 = \left[\frac{F_1}{N_1} \right] = \frac{\tau_f A_r}{\sigma_s A_r} = \frac{\tau_f}{\sigma_s} \cdot \frac{c}{\left[\alpha(1-c^2) \right]^{1/2}} \quad (1-2-15)$$

由此可知, 当 $c \rightarrow 1$ 时, $\mu_1 \rightarrow \infty$, 这说明金属与金属直接接触, 摩擦系数很大; 当 c 由 1 逐渐减小时, μ_1 值很快下降, 这就是说当界面因污染而削弱时, 摩擦系数将迅速降低, 当 c 值很小时,

则式 (1-2-15) 可写成

$$\mu_1 = \frac{c}{(\alpha)^{1/2}} = \frac{c\tau_b}{\sigma_{sv}} = \frac{\text{膜的剪切强度极限}}{\text{基体金属的压缩屈服极限}}$$

上述结论与简单粘附理论得出的结论基本相同。这是由于自然污染的界面的剪切强度极限比金属基体的低, 不可能发生粘附结点的大规模增长。真实接触面积只与法向压力与压缩屈服极限有关。

虽然这种理论仍然是以简单粘附理论为依据并包含着一些假设, 但与实际情况比较接近, 可以在较大范围内解释摩擦现象, 不再仅仅是简单粘附理论。其要点有: ①真实接触面积是由塑性变形所决定的; ②两个摩擦表面是被一层剪切强度在最低值直到基体金属剪切应力的范围内变化的膜所隔开; ③摩擦力是剪切隔开两表面的膜所需的力。

这种理论还有一定局限性, 这是由于存在以下不足之处: ①分析式 (1-2-15), 当 $c = 1$ 时, $\mu_1 = \infty$, 不符合实际情况, 显然这只是说明发生了金属与金属的直接接触, 摩擦系数最多是等于基体金属的摩擦系数。②粘附摩擦理论能够解释材料在两个摩擦表面之间的转移, 但不能解释游离磨屑的形成。实验研究表明, 转移出现在两表面往复移动一次中, 而连续沿同一路线往复移动多次会产生游离的磨屑, 这表明在摩擦过程中机理可能改变。鲍登与泰伯所作很多实验研究的结果与粘附理论完全一致, 他们这些实验是进行一次而不是多次。③粘附理论假设在接触点形成塑性变形, 产生牢固的粘附, 但实际上当法向压力除去后, 很难测出粘附力。接触并不完全处于塑性, 有的接触点处于弹性状态, 微凸体表面膜完整无缺, 形成表面膜之间的结点, 有的微凸体的表面膜破坏了, 形成金属与表面膜或金属与金属之间的结点。而粘附理论只考虑了污染膜与污染膜之间的结点, 因而与实际情况有较大出入。尽管存在以上问题, 目前这种理论仍然得到广泛应用。

3. “犁沟”作用

“犁沟”作用是指摩擦表面中较硬的微凸体嵌入较软金属表面, 引起后者的塑性变形, 并在相对运动中被犁出沟槽的现象。有时又称“刨削”作用。“犁沟”作用也就是摩擦力的机械分力所产生的结果。常见的“犁沟”作用模型是将微凸体顶部看成是圆球体或圆锥体等。图 1-2-6 是以球体作为微凸体

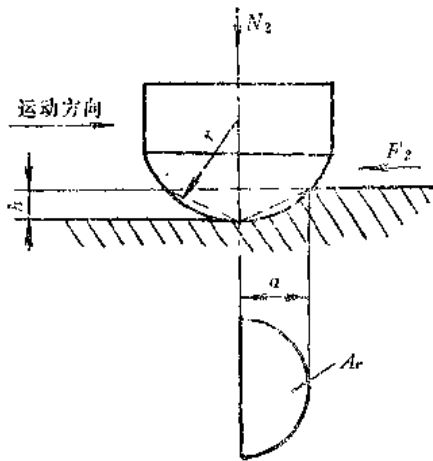


图1-2-6 圆球状微凸体犁削模型

顶部的犁削模型。由图可见，粗糙表面在软的表面滑过时，硬的球状微凸体与软表面接触，产生塑性变形，并将软材料挤向两边，划出一道沟。在垂直于运动方向上的截面积可近似取为三角形面积 ha ， h 为嵌入深度， a 为接触区半径。微凸体所受阻力 $F_2 = ha\sigma_T$ ， σ_T 为材料的塑性挤压压力，微凸体上的载荷为

$$N_2 = A_r \sigma_T = \frac{1}{2} \pi a^2 \sigma_T$$

由此
$$\mu_2 = \frac{F_2}{N_2} = \frac{ha\sigma_T}{\frac{1}{2} \pi a^2 \sigma_T} = \frac{2h}{\pi a}$$

又因
$$a \approx \sqrt{2rh}$$

故
$$\mu_2 = \frac{2h}{\pi \sqrt{2rh}} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \sqrt{\frac{h}{r}} = 0.45 \sqrt{\frac{h}{r}} \quad (1-2-16)$$

式中 r —— 微凸体曲率半径。

更准确的计算可得

$$\mu_2 = 0.55 \sqrt{\frac{h}{r}} \quad (1-2-17)$$

对于弹性接触の場合

$$\mu_2 = 0.19\alpha_e \sqrt{\frac{h}{r}} \quad (1-2-18)$$

式中， α_e 为滑动时的滞后损失系数。对于滑动的球， $\alpha_e = 2.2\alpha$ ， α 为材料拉压时的滞后损失系数，可由实验求得。

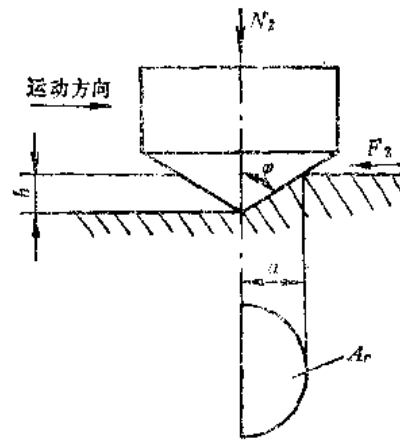


图1-2-7 圆锥状微凸体犁削模型

当以图1-2-7所示的圆锥体作为微凸体顶部的犁削模型时，亦可计算得到

$$\mu_2 = \frac{F_2}{N_2} = \frac{2h}{\pi a}$$

但
$$\frac{h}{a} = c \operatorname{tg} \varphi$$

故
$$\mu_2 = \frac{2}{\pi} c \operatorname{tg} \varphi \quad (1-2-19)$$

式中， φ 为锥顶半角，大多数金属表面微凸体的有效斜率很少超过 $5^\circ \sim 6^\circ$ ，即 $\varphi = 85^\circ \sim 84^\circ$ ，也就是 $\mu_2 \approx 0.05$ 。故与摩擦的粘附分力相比，“犁沟”影响较小些。

4. 分子-机械理论

苏联克拉盖尔斯基在1939年提出了摩擦的分子-机械理论，认为外摩擦具有双重特性，既不仅要克服对偶表面间分子相互作用的连接力，而且还要克服使表面层形状畸变而引起的机械阻力（变形阻力）。具体地说，作相对运动的对偶表面在法向载荷下接触时，由于表面粗糙，首先是表面上的微凸体凸峰接触，相互啮合，较硬表面微凸体嵌入较软表面，接触点的压力增高，实际接触面积增加，当压力达到压缩屈服极限 σ_s 以后，将产生塑性变形。在表面作切向运动时，这些微凸体将“犁削”表面，使表面层畸变。与此同时在表面间存在分子相互作用的连接力，使表面粘附，生成结点，严重者生成微小的固相焊合点，在表面作切向运动时将这些粘附连接剪断。也就是摩擦力由机械分力与分子分力两部分组成（图1-2-8），即

$$F = F_1 + F_2$$

或

$$\mu = \mu_1 + \mu_2$$

式中

F ——总摩擦力;

μ ——总摩擦系数;

F_1 ——摩擦的分子分力;

F_2 ——摩擦的机械分力;

μ_1 ——由分子分力求得的摩擦系数;

μ_2 ——由机械分力求得的摩擦系数。

$$\mu_1 = \frac{\tau_0}{p_r} + \beta \quad (1-2-20)$$

$$\mu_2 = k_x \sqrt{\frac{h}{r}} \quad (1-2-21)$$

由此

$$\mu = \frac{\tau_0}{p_r} + \beta + k_x \sqrt{\frac{h}{r}} \quad (1-2-22)$$

式中 τ_0 ——分子粘附连接的剪切阻力, 无润滑的金属摩擦时: $\tau_0 = 2.5 \sim 30 \text{MPa}$; 有润滑时为 1MPa ; 金属与聚合物摩擦时: $\tau_0 = 0.2 \sim 0.5 \text{MPa}$;

p_r ——摩擦结点的平均压力;

β ——与摩擦的分子分力有关的系数;

k_x ——与摩擦的机械分力有关的系数, 对于

塑性接触の場合, $k_x = 0.55$; 对于弹性接触の場合, $k_x = 0.19\alpha_0$ 。

5. 其他理论

关于摩擦的理论, 近年来还有能量理论及三分量的理论等。

美国麻省理工大学 Nam P. Suh 认为, 滑动表面间的摩擦系数受三个分量的综合影响, 即微凸体的变形分量 μ_d 、由磨损颗粒及硬表面微凸体的“犁沟”分量 μ_p 以及平表面间的粘附分量 μ_a 。这三个分量所起作用的大小取决于受滑动经历影响的界面滑动状况、所使用材料的特性、表面形貌与环境等。

研究摩擦的能量理论的学者很多, 如美国的里格尼利拉宾诺维奇、德国的弗莱舍尔、原苏联的卡斯杰茨基等。共有两种看法, 一种是从能量平衡的观点综合分析摩擦过程, 一种是从表面能量的观点出发分析摩擦机理。弗莱舍尔等人从摩擦过程中的能量平衡出发, 将摩擦功看成是由变形功、达到某一预定的热相变的动能、发生完全相变的能量、容积变化所作的功、辐射能、电位能、激发化学过程的能、表层解吸的能量等组成。而里格尼等则假设在稳态滑动时, 全部摩擦功用来使材料产生塑性变形, 并且转化成热。此处不作详述。

(三) 滚动摩擦

滚动接触通常可分为四个类型:

- (1) 自由滚动;
- (2) 同时承受切向牵引力的滚动;
- (3) 在槽形滚道中滚动;
- (4) 沿曲线滚道滚动。

实际上对于某一具体滚动体的滚动来说, 常常是一种综合型的滚动, 如车辆的传动轮是 (1)、

(2) 两类滚动的综合, 径向球轴承是 (1)、(2)、

(3) 三类滚动的综合, 而止推球轴承则是全部四类滚动的综合。

达芬奇、库伦、杜波伊特、莫林、雷诺、希思科特及汤姆林森等都先后研究过滚动摩擦, 提出了对滚动摩擦理论的认识, 研究了接触区内的微观滑移、材料内部的弹性迟滞、塑性变形与粘附、滚动时能量的储存与散逸等因素的作用。形成了不同的滚动摩擦理论。

1. 滚动摩擦系数

如圆柱滚动体沿固定平面基础滚动, 当它转过角度 φ 后, 滚动体轴线对于基础移动了 $R\varphi$, 则这种

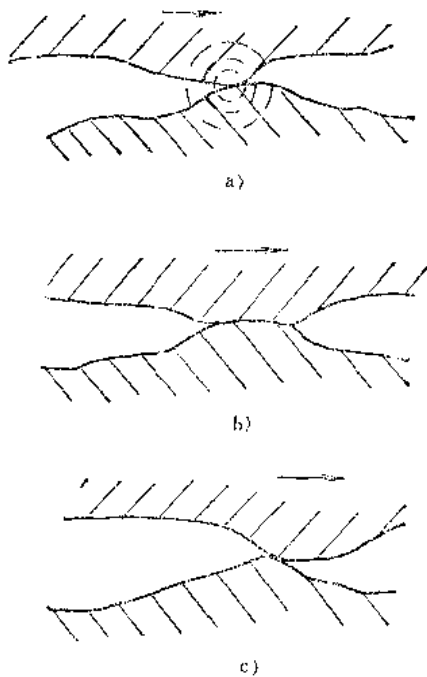


图1-2-8 单个微凸体的摩擦过程

- a) 第一阶段: 弹性变形、塑性变形、“犁沟”
- b) 第二阶段: 粘附连接 c) 第三阶段: 剪切结点, 弹性恢复

运动就称为无滑移的滚动，或称为纯滚动（图1-2-9）。此时滚动体上与基础接触的一点相对于基础固定不动，而且滚动体上其他各点的速度正象该滚动体在此瞬间以角速度 ω 绕O点旋转那样。

$$\omega = \frac{v_0}{OO_1} \quad (1-2-23)$$

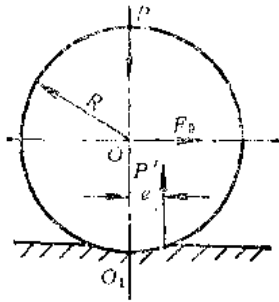


图1-2-9 沿平面滚动的物体

过 O_1 而垂直于滚动平面的轴称为瞬时旋转轴。实际上由于物体接触时发生变形，在滚动时滚动体沿一定的表面接触，不是沿瞬时旋转轴线接触。如果滚动体承受 P 力，其作用线为 OO_1 ，则如实验所表明，为了使滚动体作等速滚动，必须以某种方式对滚动体施加旋转力矩。为此，只要对滚动体施加一 F_0 力，而其作用线与瞬时旋转轴相距一段非零的距离即可。这个力对 O_1 点的力矩，数值等于滚动阻力矩。滚动摩擦系数 k 可定义为驱动力矩与法向载荷之比，即

$$k = \frac{M}{F} = \frac{F_0 R}{P} \quad (1-2-24)$$

由此可见滚动摩擦系数与滑动摩擦数不同，它是一个具有长度因次的有量纲量。表1-2-4为常用材料的滚动摩擦系数，表1-2-5为轴承（有润滑）的

表1-2-4 常用材料的滚动摩擦系数

摩擦副材料	滚动摩擦系数 (cm)
淬火钢-淬火钢	0.001
铸铁-铸铁	0.05
木材-钢	0.03~0.04
木材-木材	0.05~0.08
铁或钢质车轮-木面	0.15~0.25
钢质车轮-钢轨	0.05

注：表中滚动摩擦系数是试验数据。由于实际工作条件和试验条件不同，表中数据只能作近似计算参考。

摩擦系数。

表1-2-5 轴承（有润滑）的摩擦系数

轴承名称	摩擦系数
向心球轴承	0.0012
推力球轴承	0.0012~0.0018
向心球面球轴承	0.0014
向心球面滚子轴承	0.0012
向心短圆柱滚子轴承	0.0011
向心圆柱滚子轴承	0.0015
滚针轴承	0.0025
球面止推圆柱滚子轴承	0.0025
圆锥滚子轴承	0.0017~0.0025
液体摩擦	0.001~0.01
半液体摩擦	0.01~0.1
半干摩擦	0.1~0.1~0.5
青铜轴瓦（用于热轧钢）	0.07~0.1
青铜轴瓦（用于冷轧钢）	0.04~0.08
层压胶木轴承	0.004~0.005
特殊密封的液体摩擦轴承	0.003~0.005
特殊密封的半液体摩擦轴承	0.005~0.01
圆柱滚子轴承	0.002~0.005

此外，滚动阻力系数 f 是无量纲量，它等于驱动力 F_0 在单位距离上所作的功与法向载荷之比：

$$f = \frac{A\varphi}{P\Delta l} \quad (1-2-25)$$

当滚动体转过角度 $\Delta\varphi$ 后，驱动力所作功为 $A\varphi = M\Delta\varphi$ ，而滚动体所走过的距离为 $\Delta L = R\Delta\varphi$ ，根据定义，滚动阻力系数为

$$f = \frac{M\Delta\varphi}{P R \Delta\varphi} = \frac{k}{R} \quad (1-2-26)$$

2. 自由滚动

滚动体在平面上自由滚动时，假定接触区无滑移发生，滚动摩擦阻力主要来自滚动过程中材料内部的弹性迟滞。滚动体接触区的前半部发生弹性压缩，后半部因卸载而由压缩状态复原。如图1-2-10所示，如果材料弹性良好，则前半部弹性压缩所作

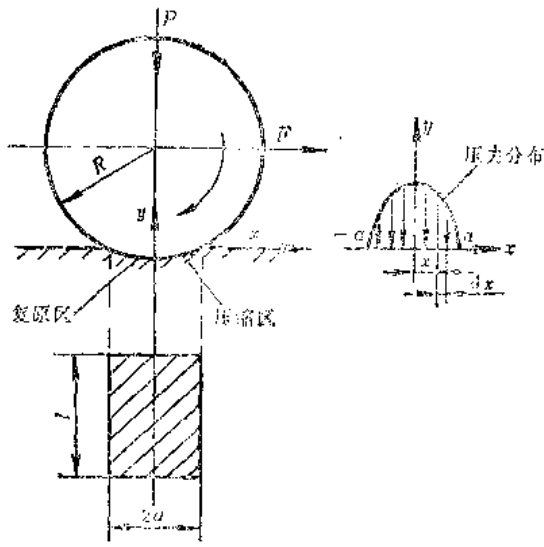


图1-2-16 圆柱与平面接触时的压力分布

功与后半部复原所消耗功几乎相等，而几乎无净能量损耗。但实际上在弹性应力循环中总是由于弹性迟滞损耗而有能量净损耗，因此可由滚动中的能量损耗推导出自由滚动阻力。

在接触区前半部，作用在宽为 dx 、长为 l 的小单元上的接触压力使阻力升高 $p l dx$ ，由此阻力在接触点中线所产生的阻碍力矩为 $p l x dx$ ，则前半部压缩区的总阻碍力矩为

$$M = \int_0^a p l x dx$$

$$M = \frac{2Pa}{3x} \quad (1-2-27)$$

再考虑当圆柱体滚动一个角度 θ 时的滚动距离 s 。在压缩区所作全部功为 $M\theta$ ，而在接触区后半部分的弹性复原，意味着前半部受挤压所作弹性功大部分将复原。但由于具有弹性迟滞损耗而导致一个能量净损耗。通常用 ϵ 来表示迟滞损耗百分比，由此为克服弹性迟滞所作功为 $\frac{\epsilon}{100} M\theta$ 。假设圆柱体滚动一段距离 s 时的摩擦阻力为 F ，并且 $s = R\theta$ ，则克服此阻力所作功等于克服迟滞所作功，即

$$Fs = \frac{\epsilon}{100} M\theta = \frac{\epsilon}{100} M \frac{s}{R}$$

由此
$$F = \frac{\epsilon M}{100 R} = \frac{\epsilon \times 2Pa}{300\pi R} \quad (1-2-28)$$

比值 $\frac{F}{P}$ 可以定为滚动阻力系数 K ，其意义与滑动摩擦系数 μ 相当，因此

$$K = \frac{F}{P} = \frac{2}{300} \times \frac{\epsilon a}{\pi R} = \frac{2}{300} \times \frac{\epsilon}{\pi R} \left[\frac{4PR}{\pi l E'} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1-2-29)$$

当 P 值较小及 R 值较大时，圆柱体的自由滚动阻力将很小。这可以很清楚地解释轮子在地球上滚动时在减摩上的好处。

3. 同时承受切向牵引力的滚动

作这类滚动的有机车或汽车的驱动轮、制动轮等。图1-2-11所示为车轮在平面上的滚动，为驱动此车辆，必须在运动方向对车轮施加牵引力 T ，而且此牵引力必须小于 μP ，否则此车轮将打滑。而当 $T = 0$ 时，则在车轮与钢轨间不发生滑移。在 $0 < T < \mu P$ 时的滑移情况可参看图1-2-11、1-2-12，接触区的前半部无滑移，而其余部分将有滑移。当 T 增加时，滑移面积增加，在 $T = \mu P$ 时全部面积上均有滑移。从理论上可以证明，滑移程度与 T 的关系由下式表示：

$$\frac{T}{\mu P} = \left[1 - \left(\frac{b}{a} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1-2-30)$$

由此式可知，当 $b = a$ 时， $\frac{T}{\mu P} = 0$ ，而当 $b = 0$ 时， $\frac{T}{\mu P} = 1$ 。

为了解释这种作用，以下三点值得注意：①从

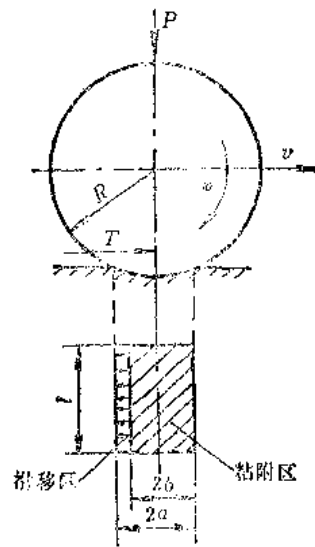


图1-2-11 车轮在平面上滚动时在接触区的滑移情况

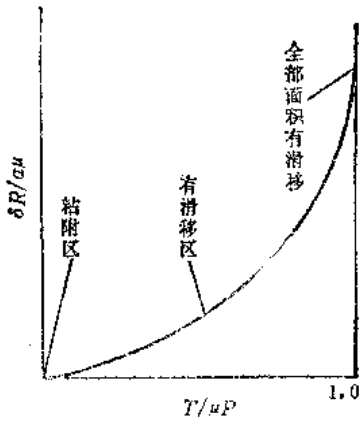


图1-2-12 具有切向牵引力的车轮滚动时蠕滑的变化情况

微观上看滑移程度很小；②产生接触的材料可能只产生弹性变形；③这种滚动运动意味着轮缘上的质点通过接触区，而运动继续进行则从另一边离开。因此，如果设想这些质点趋近接触区时，由于弹性变形的堆积而没有对轨道滑移，但当堆积的变形顺次复原时，这些质点与轨道间发生微观滑移，于是质点就走出了接触区，因而所有应变最终获得复原。

这种微观滑移机理的一个作用是：车轮并不是恰好滚过从纯粹几何形状来考虑的一段距离，即 $s \neq R\theta$ 。因而驱动轮比 $R\theta$ 稍稍多滚动一些，而制动轮则稍许少滚动一些。这种作用称为“蠕滑作用”，现在已经可以测量出蠕滑，并且其结果与理论分析相一致，由此可得

$$\frac{\delta R}{\alpha \mu} = \left[1 - \left(1 - \frac{T}{\mu P} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (1-2-31)$$

式中 δ —— 在牵引力 T 的作用下，半径为 R 的车轮在载荷为 P 时与钢轨产生宽度为 a 的接触中所发生的相对蠕滑， $\delta =$

$$\frac{\Delta v}{v}$$

Δv —— 蠕滑速度；

v —— 车轮速度。

4. 在槽形滚道中滚动

图1-2-13所示为沿着槽形滚道滚动的球与滚道的接触区内的滑移示意图。当然从基本运动学状况来看，这种滚动运动在接触区必定要有一条瞬时轴线，在这里球与滚道不发生相对运动。图中将球看成瞬时沿轴线 AA' 回转。这就是说在离开此轴线的其他接触点必然发生滑移，当然此滑移值相当小。

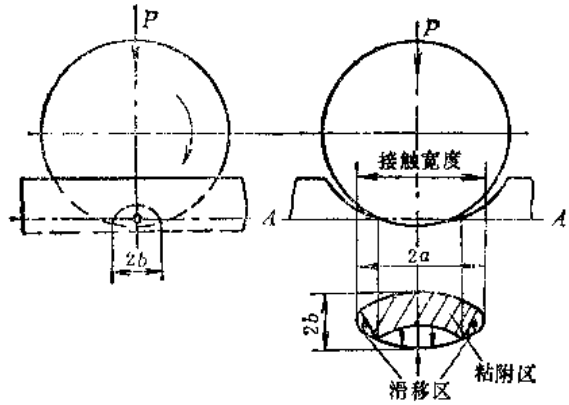


图1-2-13 在槽形滚道中滚动的球与滚道的接触区内的滑移

实际上由于表面弹性应变消除了部分滑移而使情况更为复杂。由图可以看到复杂接触式样的粘附区与滑移区。

5. 沿曲线滚道滚动

图1-2-14是球在力矩 M_z 作用下被迫沿曲线滚道滚动的示意图，此力矩引起了如图右方所示类型的微观滑移。与上述相同，表面弹性应变消除了部分滑移。

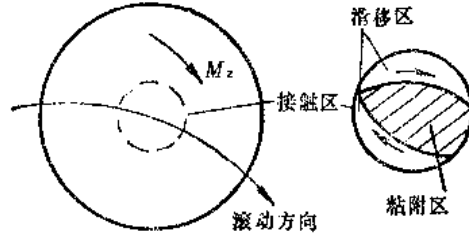


图1-2-14 沿曲线滚道滚动的球接触区的微观滑移

6. 车辆转弯

设想驾驶一辆前轮驱动的汽车沿弯道转弯作为以上论证的一个例子。无论道路与车轮如何摩擦，我们总可以将作用于某一点 X 的摩擦力 F 来代表这种作用。如图1-2-15所示，这个力系可以分解成三个作用在坐标原点 O 上的分力 F_x 、 F_y 和力矩 M_z ，其中：

F_x —— 在运动方向驱动车辆使之制动的牵引力，它将产生上述微滑效应；

F_y —— 横向牵引力，它也将产生横向滑移，此力为转弯力，即使车辆方向改变时存在的力；

M_z —— 自调直力矩，它力图校正汽车方向，也

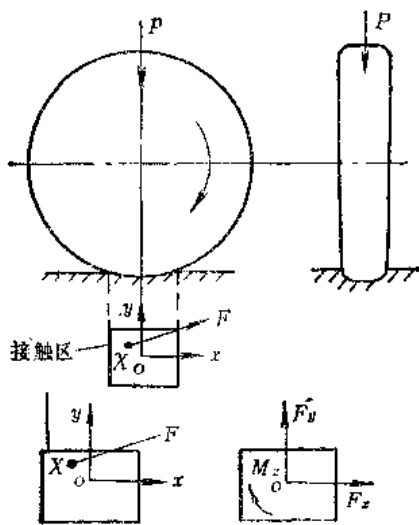


图1-2-15 轮胎与道路接触时的摩擦力

就是驾驶员在方向盘上所感觉到的车轮反抗改变运动方向的力矩。

当车辆沿直线行驶时， F_y 和 M_z 均为零。

F_x 力的作用已在前面讨论过，而横向牵引力 F_y 与自调直力矩 M_z 的关系可由高夫线图表示（图-2-16）。

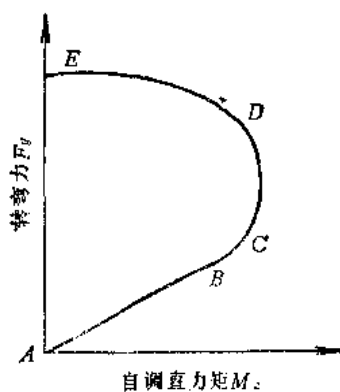


图1-2-16 表示转弯力与自调直力矩关系的高夫线图

当汽车行驶时，从图中 ABC 区段可以看到，随着转弯力 F_y 增大，自调直力矩 M_z 增大，滑动角也增大。滑动角是指运动路线比轮胎中心线落后的角度，也可理解为由自调直力矩 M_z 引起的角微滑。在 CD 区段转弯力和滑动角增大得很多，但自调直力矩只略有变化，驾驶员在方向盘上几乎感觉不出

有多大变化。 DE 区段是值得注意的位置，当转弯力增大时我们在方向盘上的感觉正好相反，似乎在倒转，此时接近于完全打滑。对于专业驾驶员， CD 和 DE 区段是难对付的时刻，当车辆由 A 向 BC 移动时滑动角只有几度，而由 C 向 D 移动时由于车辆沿弯道偏移，滑动角很大。转弯力 F_y 的最大值是根据 μP 值确定的，在接近 E 点时达到极限，这时完全打滑而失去控制。

在潮湿条件下，路面的性质和轮胎的花纹显得格外重要。这时，在轮胎和路面之间可能形成连续的流体膜，在极端情况下会因“飘滑”而失去控制。这种现象不属于摩擦问题，而成为润滑问题，一般可作为弹性流体动压润滑来处理。

第3节 磨 损

（一）磨损的定义

磨损是指摩擦副的对偶表面相对运动时工作表面物质不断损失或产生残余变形的现象。磨损过程主要因对偶表面间的机械、化学与热作用而产生。

磨损、断裂与腐蚀以及某些材料的老化是导致机械零件损坏和失效的主要原因，其中磨损失效占所有失效的60%以上。除了机械刚投入使用初期产生的磨合性（跑合）轻微磨损，会使表面更为光滑以外，一般来说零件表面磨损后，往往造成设备精度丧失，效率与使用寿命降低，因而需要更换已磨损的零件，进行维修，造成停工损失、材料消耗与生产率降低。因此人们对磨损问题极为重视，不断对磨损现象进行分析研究，找出影响磨损的因素和磨损机理，从而寻求提高零件耐磨性和使用寿命以及控制磨损的措施，减少制造费用和维修费用。这对于国民经济具有重大的意义。

磨损机理涉及到摩擦学系统的材料特性、工况条件与环境条件等。一般认为磨损的主要起因有两方面，即：①应力的相互作用。由物体上的载荷力与摩擦力的复合作用而导致磨损，磨损的形式有表面疲劳磨损与磨料磨损。②材料的相互作用。由相互作用的固体间或固体与环境（及/或界面介质）之间相互的分子间的力导致磨损。

磨损的形式有粘附磨损或摩擦化学反应（腐蚀磨损）等。

(二) 磨损的类型

1. 磨损的过程

在机械零件正常运行过程中的磨损，一般可分为三个阶段（图1-3-1）。

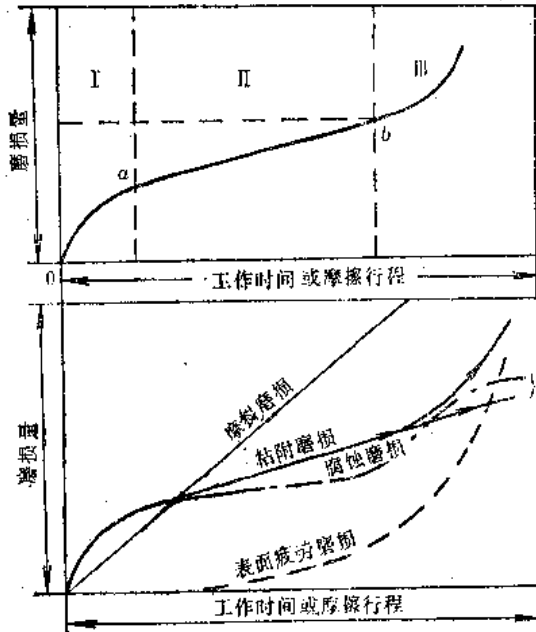


图1-3-1 正常磨损过程

I—跑合阶段 II—稳定磨损阶段
III—剧烈磨损阶段

(1) 跑合阶段 也称磨合阶段 $0a$ ，新的摩擦副表面具有一定粗糙度，真实接触面积较小。经过短时间跑合后，表面逐渐磨光，真实接触面积逐渐增大，磨损速度减缓，为正常运行稳定磨损创造条件。为了缩短跑合期，可以采用适当的加工与装配工艺，使用合适的润滑油，或是选用适当的试车规范等方法，在跑合结束后重新换油，进入稳定磨损阶段。

(2) 稳定磨损阶段 ab 这一阶段磨损缓慢稳定， ab 线段的斜率就是磨损速度，由 ab 曲线上各点的坐标，可以找到某一工作时间内（或某一摩擦行程内）零件的磨损量。

(3) 剧烈磨损阶段 b 点以后磨损速度急剧增长，机械效率下降，精度丧失，还有可能产生异常噪声及振动，摩擦副温度迅速升高，最终导致零件失效，必须进行维修。这是一般较为典型的工况恒定的磨损过程，在实际运行中可能会有意外情况发生。

2. 磨损的类型

磨损的分类取决于许多因素，例如磨损量的大小、相对运动和载荷类型、磨损机理以及摩擦表面形貌和表层破坏形式等，因此有许多分类方法。如最简单的磨损分类方法是根据磨损量将磨损分成轻微磨损与严重磨损，主要以磨屑尺寸的大小来衡量磨损的特征。磨损颗粒尺寸小于几个微米的磨损称为轻微磨损，有时轻微磨损用来表示弹性接触下的磨损，这时磨损过程发生在外层表面，表面仍然保持相对光滑，并且由摩擦中所产生的氧化层所保护。磨损颗粒尺寸大至 $100\mu\text{m}$ 的磨损称为严重磨损，有时严重磨损用来表示已达到塑性接触时的磨损。

不少学者先后提出了一些磨损分类方法，举例如下：

(1) J. T. Burwell与C. D. Strang于1962年将磨损分成磨料磨损、粘附磨损、腐蚀磨损、表面疲劳磨损（点蚀）、微动磨损、浸蚀与气蚀。

(2) M. M. Хрумов于1953年将磨损分成磨料磨损、粘附磨损、塑性变形、脆性剥落、氧化磨损和化学腐蚀磨损。

(3) Nam P. Suh于1973年提出剥层磨损理论。

(4) D. Scott于1979年将磨损分为粘附磨损、磨料磨损、表面疲劳磨损与腐蚀磨损。

(5) S. Jahanmir于1980年提出的分类是粘附磨损、剥层磨损、微动磨损、磨料磨损、浸蚀、冲击磨损、表面疲劳、腐蚀磨损、扩散磨损与电接触磨损。

(6) D. Godfrey于1980年提出的分类是轻微粘附磨损、严重粘附磨损、磨料磨损、浸蚀、表面疲劳、剥层磨损、腐蚀磨损、电腐蚀磨损、点蚀、气蚀损伤、放电与抛光。

(7) S. L. Rice于1980年提出的分类是粘附磨损、磨料磨损、疲劳磨损、腐蚀或氧化磨损、以及电磨损。

(8) DIN50320中分类是粘附磨损、磨料磨损、表面疲劳与摩擦化学反应磨损。

(9) И. В. Крагельский于1984年提出的分类是磨料磨损、分子的（粘附）磨损、疲劳磨损、腐蚀磨损、气蚀磨损、浸蚀磨损等。他在1981年Eurotrib'81会议上的报告中将磨损分为三类，即在弹性接触下产生的轻微磨损，在塑性接触下产生的磨料磨损（带有明显的交叉状表面粗糙度）和粘

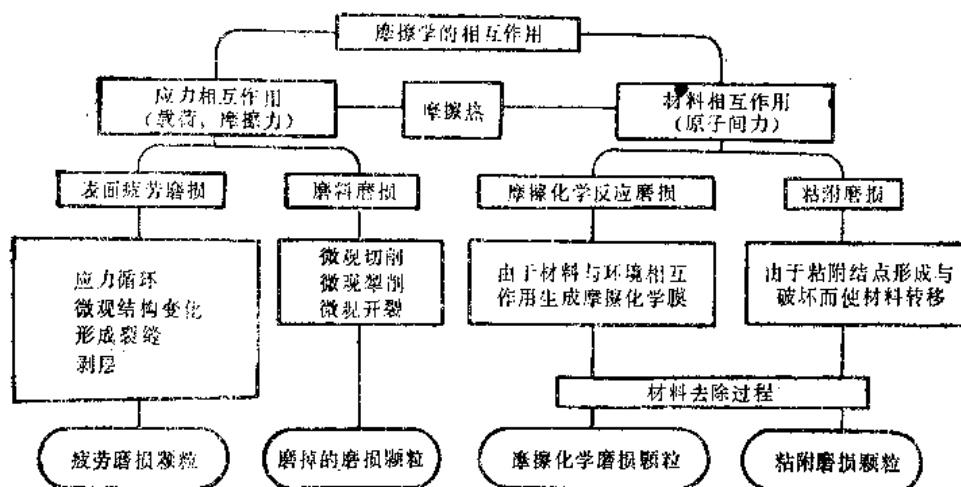


图1-3-2 摩擦学的相互作用与磨损机理的分类

附磨损(材料转移到对偶表面上)。

(10) H. Czichos 于1985年提出了图1-3-2所示的磨损分类, 表明了摩擦学的相互作用关系与磨损机理。

(11) M. Godet 等于1984至1989年间几次著文提出了三体磨损机理。对于塑料或高聚合物、陶瓷等还会产生另外一些类型的磨损。如作相对运动的高聚合物往往因受热的影响而软化、烧蚀、熔融或蒸发, 使材料损耗。

(三) 磨损的机理

目前有不少学者仍在对磨损机理进行深入研究, 存在着不同的理论。下面介绍一些最基本类型的磨损机理。

1. 粘附磨损

粘附磨损是接触表面相对运动时, 由于分子间的吸引力作用而产生固相局部焊合(粘附连接), 致使材料从一个表面转移到另一个表面而造成的一种磨损。

粘附磨损的发生机理和摩擦过程的粘附机理一样, 可用两个相对运动的接触表面之间存在分子吸引力的作用来解释。如图1-3-3所示, 粗糙不平的表面, 在法向载荷下接触时, 受分子吸引力的作用, 微凸体峰顶受载而产生接触应力, 发生弹性或塑性变形, 真实接触面积扩大, 表面温度升高。当峰顶承受过大载荷, 致使接触应力超过材料流动强度(材料硬度)时, 塑性表面粘附连接并产生固相焊合, 在相对运动过程中粘附结点就会受到剪切而

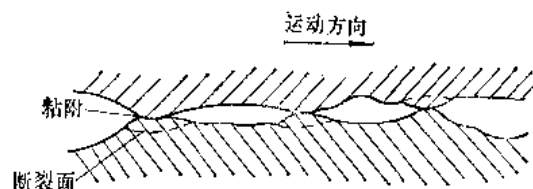


图1-3-3 粘附磨损状态

断裂, 脱离表面并转移到另一个表面上。如果结点剪切强度低于基体强度时, 在有滑动情况下, 剪切面落在界面上, 显不出太大的磨损, 即产生轻微磨损。但如果结点剪切强度高于基体强度时, 剪切面发生在基体内, 这时就会发生“胶合”、或“咬粘”之类严重磨损。这时常常会有大片材料粘连到对偶表面上。

当表面有自然污染物或受环境介质影响时, 由于粘结点的强度降低, 粘附磨损的程度会有所减轻。在干摩擦状态下接触表面最容易产生粘附磨损, 而且聚合物与表面粗糙度较低的金属表面接触时更容易产生粘附磨损。但在两表面间具有较厚的流体润滑剂将表面分隔开, 或是在润滑剂中添加有极压添加剂, 因而在金属表面形成边界润滑剂膜时, 均可保护表面不产生粘附磨损。

根据粘附磨损理论, 阿恰尔德曾提出了一个计算发生粘附磨损时所去除的材料体积 V 的宏观规律, 可推导如下(图1-3-4)。

将单个微凸体凸峰顶部看成是半径为 a 的圆球面, 则单个微凸体凸峰顶部体积(以半球面计)为

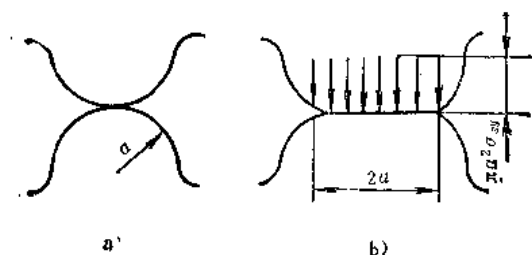


图1-3-4 单个微凸体凸峰接触模型

a) 加载前 b) 加载后

$\frac{2}{3}\pi a^2$ 。加载后球的接触面积为 πa^2 ，因此单位滑动长度内的磨损体积 V' 为

$$V' = \Sigma \frac{\frac{2}{3}\pi a^2}{2a} = \frac{1}{3}\Sigma \pi a^2$$

若全部接触的微凸体凸峰数为 n ，则

$$V' = \frac{n}{3}\pi a^2$$

总法向载荷 N 为

$$N = n\pi a^2\sigma_{sy} \quad \text{或} \quad n\pi a^2 = \frac{N}{\sigma_{sy}}$$

故

$$V' = \frac{N}{3\sigma_{sy}}$$

在滑动距离为 l 时，粘附磨损所去除的材料体积 V 为

$$V = V'l = \frac{Nl}{3\sigma_{sy}}$$

由于

$$\sigma_{sy} \approx \frac{1}{3}H$$

故

$$V = \frac{Nl}{H}$$

如果全部接触点的 K 部分产生磨粒，则上式应修正为

$$V = K \left(\frac{Nl}{H} \right) \quad (1-3-1)$$

式中 N ——法向载荷；

l ——滑动距离；

H ——较软材料的布氏硬度；

σ_{sy} ——屈服极限；

K ——无量纲的磨损系数，与摩擦副材料和工作条件有关，可以用来衡量表面微凸体的作用是否将有可能产生磨损。

式 (1-3-1) 是粘附磨损理论的基本式。此式可

以改写成设计人员感兴趣的形式。

如果以名义面积 A_0 除式 (1-3-1) 的两边，则可以得到

$$\frac{V}{A_0} = \left(\frac{K}{H} \right) \left(\frac{N}{A_0} l \right)$$

或

$$h = \left(\frac{K}{H} \right) pl$$

再以滑动速度 v 与时间 t 表示 l ，可得

$$h = \left(\frac{K}{H} \right) pvt$$

$$t = \frac{h}{pv} \left(\frac{H}{K} \right) \quad (1-3-2)$$

式中 p ——平均或额定压力；

t ——时间或寿命；

h ——磨损深度。

式 (1-3-2) 较为实用。可得 pv 值与寿命间的关系，也可以求得磨损深度。

但使用磨损系数 K 作为衡量磨损品质的因数有两点欠妥处：① K 值范围很大；② 与其值相反， K 值低时磨损性能优异。因此可采用抗磨因数 AWN (表1-3-1)，即

$$AWN = -\log_{10} K$$

粘附磨损常见于缸套—活塞环、蜗轮—蜗杆副，轴—轴瓦，丝杠—螺母副，凸轮—顶杆副，滑动导轨副等摩擦副。

粘附磨损有以下形式的磨损

涂沫 (Smearing) 即一个表面的材料 (通常是会软化或熔化的材料) 发生迁移 (转移)，并以薄层重新涂敷到一个或两个表面上。

划伤 (Scratching) 由表面局部固相焊合或磨料磨损所引起的沿滑动方向形成的微细擦痕或“犁痕”。

刮伤 (Scoring) 又称划伤，是同上原因形成的严重擦痕。

胶合 (Scuffing) 两滑动表面间发生固相焊合而引起的局部损伤，但没有发生局部表面熔合。

咬粘 (Seizure) 又称咬死，由界面摩擦致使表面焊合，而造成表面相对运动停止。这种表面焊合是由于表面间的粘附作用所引起的。

这些形式的磨损，有时也会由其他形式的磨损如磨料磨损等所引起。

2. 磨料磨损

磨料磨损是接触表面作相对运动时由硬质颗粒或较硬表面上的微凸体，在摩擦过程中的微“犁削”、

表1-3-1 摩擦副的磨损系数K和抗磨因数AWN

轴 承 材 料		环 境		K	AWN
磨损表面	对 偶 面	大 气	润 滑 剂		
52100钢	52100钢	干 空 气	无	1.0×10^{-5}	3.0
低碳钢	低碳钢	空气	无	2.3×10^{-3}	2.6
60/40铅黄铜	工具钢	空气	无	2.0×10^{-3}	2.7
钨钴合金	工具钢	空气	无	1.8×10^{-5}	4.7
52100钢	52100钢	空气	环己烷	8.4×10^{-6}	5.1
聚四氟乙烯	工具钢	空气	无	8.3×10^{-6}	5.1
52100钢	52100钢	空气	烷烃油	5.2×10^{-7}	6.5
聚乙烯	工具钢	空气	无	4.3×10^{-6}	7.3
铝青铜	渗碳钢	空气	齿轮油	2.5×10^{-6}	7.6
渗碳钢	渗碳钢	空气	齿轮油	1.6×10^{-6}	7.8
52100钢	52100钢	空气	烷烃油/TCP	3.3×10^{-6}	8.5
52100钢	52100钢	空气	发动机油	2.0×10^{-10}	9.7

微“切削”与微开裂综合作用而引起的表面擦伤与表层材料脱落或分离出磨屑来。

磨料磨损是最常见的磨损，约占磨损总数的一半。磨料磨损的产生和磨损的材料特性与对偶表面硬度差异、磨粒类型、磨粒对材料楔住的程度等有关。从磨料磨损的机理来看，作相对运动的两表面中，较硬表面上的微凸体或硬质颗粒对较软表面微“犁削”而产生塑性变形，形成沟槽，是一种最常用的简单模型。另一种类型的磨料磨损是磨粒对表面进行微“切削”，使之产生弹性变形，直至发展成较严重的磨料磨损，从而将材料从表面去除。还可见到一种三体磨料磨损，称为高应力磨料磨损，即在两个滑动表面之间存在第三种物质，如泥沙、矿石粉之类硬颗粒状物质。这类磨损常见于农业机械、工程机械、矿山及球磨机械中，见图1-3-5。而在滑动表面间不存在第三种物质的磨料磨损称为二体磨料磨损，或称低应力磨损。另一种形式的磨料磨损是磨粒浸蚀，即磨粒随同液流或气流冲击机械零件的工作表面，造成磨蚀或产生疲劳裂纹。常见于喷砂机喷嘴、汽轮机或水轮机叶片、搅拌机推进器等。此外，如果磨粒运动方向接近垂直时，称为冲击磨损，此时磨粒与表面产生高应力碰撞，在表面上磨出较深的沟槽，并有大颗粒材料从表面脱落，或产生疲劳裂纹。冲击磨损与磨粒浸蚀均与冲击能量有关。

磨料磨损的机理一般认为是磨粒的犁削与微观切削过程，也有人认为伴随着挤压剥落与疲劳破坏。常用的基本模型是拉宾诺维奇在1965年首先提

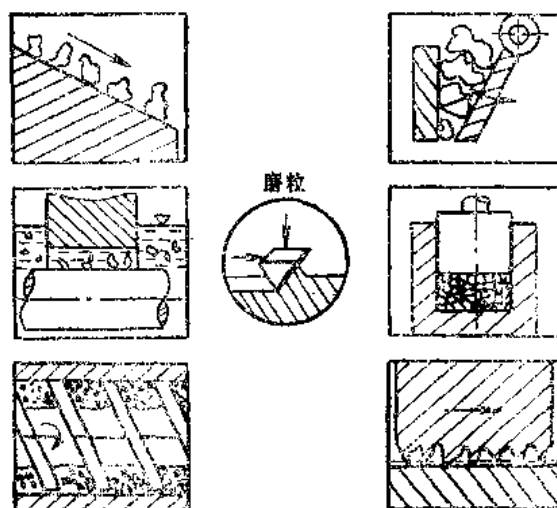


图1-3-5 磨料磨损的形式

出的，以一个半球形顶部的圆锥体或微凸体嵌入并犁削较软表面，见图1-3-6。假设凸峰顶端圆锥顶角为 2φ ，嵌入深度为 h ，犁削槽宽 $AB=2a$ ，由此可知在垂直平面上凸峰的投影面积为 ah 。当凸峰在较软表面划过 dl 距离时，使之移去一个体积为 dV 的金属。因此

$$dV = ahdl$$

$$h = a \operatorname{ctg} \varphi$$

$$dV = a^2 dl \operatorname{ctg} \varphi$$

由于较软金属的屈服极限与硬度 H 成正比，用近似法可得一个微凸体承担的载荷 ΔN 为

$$\Delta N = \frac{1}{2} \pi a^2 H$$

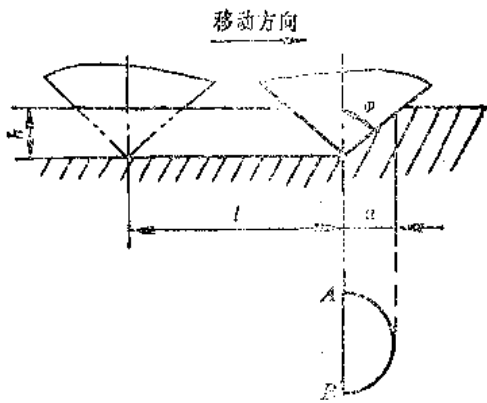


图1-3-6 圆锥状微凸体对表面的划伤

若总载荷 N 由 n 个微凸体共同来承担, 即

$$N = n \Delta N = \frac{1}{2} \pi n a^2 H$$

$$\frac{dV}{dl} = \frac{2 \Delta N}{\pi H} c \lg \varphi$$

把硬表面所有微凸体凸峰的接触面积所起作用加在一起, 可得

$$\frac{V}{l} = \frac{2N}{\pi H} c \lg \varphi$$

$$V = \frac{2}{\pi} c \lg \varphi \frac{Nl}{H} \quad (1-3-3)$$

或

$$\frac{V}{l} = K \frac{N}{H} \quad (1-3-4)$$

式中, V 为磨损去除的材料体积, K 为磨粒磨损常数, 有时称为磨料磨损系统的效率, 根据磨粒硬度、形状和起切削作用的磨粒数量等因素而定。

上式是一种过于简化的模型, 忽略了许多实际因素, 因此不少学者提出了一些其他修正因数。例如考虑磨粒分布情况、磨屑生成概率、材料弹性变形和滑动前方材料堆积产生的接触面积变化、材料韧性、润滑状况等, 一般通过试验进行确定。但它反映了磨料磨损的基本规律。

通常为了研究磨料磨损而采用了一系列实验室模拟试验, 例如磨削带或磨削轮试验、橡胶枪试验、肖-盘试验等。虽然与现场使用结果有一些差异, 但了解磨损的基本现象、缩短试验周期、减少试验费用仍然是有用的。

为了提高机械零件对磨料磨削的耐磨性, 必须在设计机械产品时选择适当的耐磨材料和涂层, 使之具有足够的硬度, 降低表面粗糙度, 增加润滑膜厚度, 注意加强对滑动表面的防护和密封, 防止外界灰尘和泥沙的进入, 以减少磨粒的微观切削作

用, 降低磨粒对表面的作用力, 并使载荷均匀分布。另一方面要选用适当的润滑油或空气的过滤装置, 定时检查及监测润滑油或空气的污染度, 及时清洗及更换滤芯, 以保持清洁。

3. 表面疲劳磨损

表面疲劳磨损是指两个相互作滚动或滚动兼滑动的摩擦表面, 在交变接触应力重复作用下, 由于表层材料疲劳, 产生微观裂缝并分离出磨粒或碎片而剥落, 形成凹坑, 造成磨损。有时又称点蚀 (Pitting) 或接触疲劳磨损。这种磨损常见于滚动轴承、齿轮、凸轮、钢轨与车轮等摩擦副表面。摩擦表面微凸体周围应力场变化所引起的微观疲劳现象, 也属于这类磨损。

(1) 表面疲劳磨损的形式

1) 表层萌生与表面萌生疲劳磨损 在循环接触应力作用下, 磨损的疲劳裂纹发源在材料表层内部的应力集中源, 如非金属夹杂物或空穴处狭窄区域, 与表层内最大剪应力的剪应力的位置相符合。裂纹萌生以后, 首先顺滚动方向平行于表面扩展, 然后分叉延伸到表面, 使磨屑剥落后形成凹坑。这种裂纹萌生所需时间较短, 但裂纹扩展速度缓慢, 其断口比较光滑。表层萌生疲劳磨损通常是滚动轴承的主要破坏形式。随着真空冶炼技术和退氧钢的发展, 钢材内部质量明显提高, 从而大大减少了疲劳裂纹在表层内萌生的可能性。

表面萌生的疲劳磨损主要发生在高质量钢材以滑动为主的摩擦副。裂纹发源在摩擦表面上的应力集中源, 例如切削痕、碰伤痕、腐蚀或其它磨损的痕迹等。此时裂纹由表面出发以与滑动方向夹 $20 \sim 40^\circ$ 角向表层内部扩展, 到一定深度后分叉形成脱落凹坑, 其断口比较粗糙。这种磨损的裂纹形成所需时间较长, 但扩展速度十分迅速, 介质和润滑剂对裂纹扩展有影响。

由于表层萌生疲劳破坏坑的边缘可以构成表面萌生裂纹的发源点, 因此通常两种疲劳磨损是同时存在的。

2) 剥落 (Spalling) 与点蚀磨损 剥落是指由鳞片状表面分离出的磨损颗粒, 通常是次表面疲劳的结果, 凹坑浅而面积大。而点蚀是指由于表面疲劳, 材料移去或脱落而在表面形成麻点状凹坑。

(2) 影响表面疲劳磨损的因素

1) 在于摩擦或润滑条件下的宏观应力场是因素之一。首先是载荷大小及载荷性质决定了摩擦副

的宏观应力场, 直接影响疲劳裂纹的萌生和扩展。接触表面的摩擦力以及应力循环速度也影响接触疲劳磨损。如少量滑动的存在及应力循环速度过大都会导致降低疲劳磨损寿命。

2) 摩擦副材料的力学性能和强度以及材料内部缺陷与疲劳磨损有密切关系。如钢材中的非金属夹杂物, 特别是脆性夹杂物, 在循环应力作用下与基体材料脱离, 形成空穴, 构成应力集中源, 从而导致疲劳裂纹的早期出现。采用具有适当渗碳层的渗碳钢及较高硬度的表面硬化钢, 可以改善表面抗疲劳磨损性能。此外, 摩擦表面的粗糙度也与疲劳寿命有密切关系。如降低滚动轴承表面粗糙度可提高疲劳寿命。在部分膜弹流润滑状态下, 由油膜厚度和表面粗糙度所确定的膜厚比是影响表面疲劳的重要参数。

3) 润滑剂或工作介质的物理化学作用对疲劳寿命也有较大影响, 实验证明增加润滑油粘度将提高接触疲劳寿命, 可以阻滞裂纹的形成与扩展。

(3) 表面疲劳磨损的机理 表面疲劳磨损的产生具有很强的随机性质, 在相同条件下同一批试件的疲劳寿命之间有很大差异, 因此目前还没有形成公认的完善机理。比较流行的有前苏联克拉盖尔斯基与英国哈林等提出的理论。

克拉盖尔斯基的疲劳磨损计算模型:

$$I_h = i_h \frac{A_r}{A_a} = \frac{h}{n} \sqrt{\frac{h}{r}} \frac{p_a}{p_r} a \quad (1-3-5)$$

式中 I_h ——线磨损率;

i_h ——单位磨损率;

A_r ——实际接触面积;

A_a ——名义接触面积;

h ——嵌入深度;

r ——微凸体曲率半径;

p_a ——名义压力;

p_r ——实际压力;

a ——重叠系数, $a = \frac{A_r}{A_a}$;

n ——引起变形体积破坏的循环次数;

K ——系数;

$$K = \frac{1}{2(\nu+1)} \sqrt{\frac{\nu}{2\alpha}}$$

ν ——支承面曲线的幂近似参数。

对于球状微凸体模型, 在弹性接触下 $\alpha = 0.5$, 当 ν 值范围为 $\nu = 1 \sim 3$ 时, $K = 0.25 \sim 0.21$, 在塑

性接触下 $\alpha = 1$, 当 $\nu = 1 \sim 3$ 时, $K = 0.1 \sim 0.15$ 。

在实用上 $\frac{h}{r}$ 值在 $10^{-3} \sim 10^{-1}$ 范围内, 磨损率的变化范围为 5~6 个数量级, 这在很大程度取决于 n 值的很大变化范围。其中在弹性接触下 $n = \left(\frac{\sigma_0}{\sigma}\right)^t$, 在塑性接触下 $n = \left(\frac{e_0}{e}\right)^t$, 此处 σ 与 e 分别为作用的应力与应变, σ_0 与 e_0 分别为接近于断裂时的应力与应变 (伸长率), t 为摩擦疲劳曲线的参数, 一般 $t \approx 2 \sim 3$ 。

哈林的疲劳磨损计算模型:

$$V = c \frac{\eta \gamma}{\varepsilon_1^m H} N l \quad (1-3-6)$$

式中 V ——磨损去除的材料体积;

H ——材料硬度;

N ——总载荷;

l ——移动行程长;

γ ——规定颗粒尺寸的常数;

η ——微凸体的直线分布;

ε_1 ——在一个加载循环内失效时的应变值;

m ——疲劳失效判据常数, 对于金属可取

$m = 2$ 。

由此可见疲劳磨损的计算模型与前面所述粘附磨损计算模型有相似处, 如式中 V 与 H 、 N 、 l 的关系, 在某种程度上是对后者的修正。考虑了疲劳磨损与失效, 实际应用时还有许多因素要认真分析, 才能得到预期结果。

4. 剥层磨损

剥层磨损 (Delamination Wear) 的概念是 1972 年美国麻省理工学院的苏等人提出的。这种理论与一般磨损理论完全不同, 是建立在弹塑性力学分析和实验基础之上的磨损理论, 能有效说明粘附磨损、表面疲劳磨损和微动磨损的现象。因此一些学者将它看成是表面疲劳磨损或粘附磨损理论的扩展。

剥层磨损理论的基本论点如下:

当摩擦副两个相互滑动表面进入接触时, 由粘附与犁削作用而通过接触点传递法向与切向载荷, 由于载荷的反复作用, 较软表面的微凸体易于变形并首先断裂, 形成小的磨损颗粒。而硬的微凸体则以较慢速度变形及去除。由此开始产生了较为光滑表面, 更多的成为硬微凸体在软平面上滑动。

在接触点由硬微凸体作用的表面牵引力导致每

一个加载循环中塑性变形不断增加，并随着反复加载而不断积聚，但与该循环中发生的总塑性变形相比，残余永久变形增加得不多。因为在此循环中，剪切变形的方向与积聚方向相反，而弹性卸载的大小与塑性应变差不多。

当次表面继续变形时，裂缝在表面下集聚。由于刚好在接触区下有三维状态的压应力存在，裂缝不会在最靠近表面处集聚。

当裂缝一旦出现后（裂缝集聚所致或是原先就存在空洞与裂缝），继续加载与产生变形将引起裂缝扩展及延伸，终于与邻近的裂缝相连接，这是在已满足了延伸准则的区域内才会发生。如在表面下存在的拉应力状态正好在移动的微凸体后面，就将导致次表层裂缝的延伸。裂缝倾向于在由材料性质与加载状态所决定的深度内与表面平行方向延伸，因为加载是沿着表面重复的。

在次表层裂缝达到临界长度时，就将变得不稳定，并将剪切至表面，产生长而薄的磨损碎片而剥离。磨屑厚度由次表面裂缝增长的位置所决定，而这又受到在表面处的法向与切向载荷大小的影响；因为它控制了正在移动的微凸体后面的最大拉应力的与深度。磨损率由裂缝集聚或延伸速率确定。

剥层磨损的计算模型如下(图1-3-7)：

当一个微凸体由左向右移动经过表面，磨损率将取决于在 i 循环内的两端 L 与 R 处的裂缝延伸 Δc_{i0} 。

$$\Delta c_i = f(\mu, d, c, \text{材料性质})$$

如果 n 是去除一层所需通过的微凸体数量，一片宽度为 w ，深度为 d 处的磨损片的容积 V_1 可由下式求得，

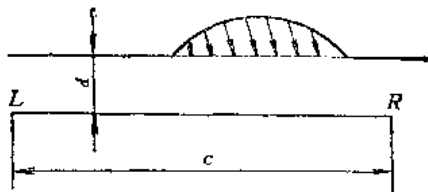


图1-3-7 在移动的微凸体下的次表面层裂缝

$$V_1 = w d \sum_i^n (\Delta c_{Li} + \Delta c_{Ri})$$

因此，这层磨损碎片的总容积为

$$V = n_c n_w w d \sum_i^n (\Delta c_{Li} + \Delta c_{Ri})$$

式中 n_c ——沿滑动方向的裂缝数目；

n_w ——在接触宽度方向内的磨屑碎片数。

由于 $n_w w$ 与接触宽度 L_w 大约相等，因此

$$V = n_c L_w d \sum_i^n (\Delta c_{Li} + \Delta c_{Ri}) \quad (1-3-7)$$

令 λ 为微凸体接触的间距(图1-3-8)， l_c 为裂缝间距， D 为试样直径， ΔL 为接触长度，可假设 L_w 与 ΔL 相等。使用此模型可以求得试样与滑块的相应的 n_c 与 n_w 数。

因为单位接触长度内的微凸体数为 $\Delta L / \lambda$ ，试样循环加载数 n 可按下式求得：

$$n = \frac{l}{\pi D} \frac{\Delta L}{\lambda} \quad (1-3-8)$$

式中， l 为去除一层所需滑动距离。试样中的裂缝数 n_c 可按下式求得：

$$n_c = \frac{\pi D}{l_c} \quad (1-3-9)$$

将式(1-3-8)、(1-3-9)代入式(1-3-7)，可得磨损率为

$$\frac{V}{l} = \frac{\Delta L^2 d (\Delta \bar{c}_L + \Delta \bar{c}_R)}{\lambda l_c} \quad (1-3-10)$$

式中， $\Delta \bar{c}_L$ 与 $\Delta \bar{c}_R$ 是在 N 个循环内的平均裂缝延伸率。

滑块的相应 n 与 n_c 数为

$$n = \frac{l}{\lambda} \quad (1-3-11)$$

$$n_c = \frac{\Delta L}{l_c} \quad (1-3-12)$$

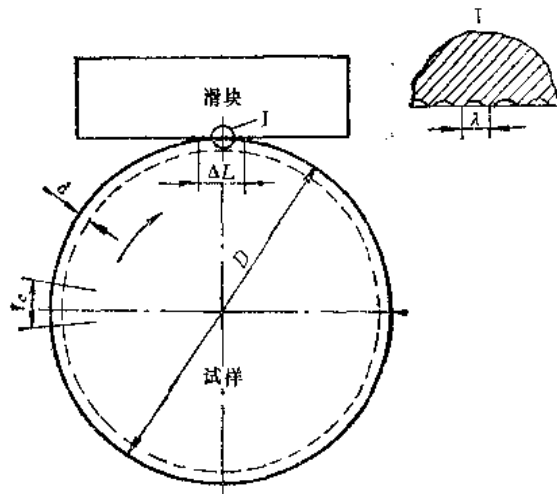


图1-3-8 磨损试样与滑块模型

将式 (1-3-11)、(1-3-12) 代入式 (1-3-7), 也可得到式 (1-3-10)。

将式 (1-3-10) 代入前面的阿恰尔德粘附磨损计算式 (1-3-1), 可得磨损系数 K 为

$$K = \frac{H \Delta L^2 d (\Delta \bar{\epsilon}_L + \Delta \bar{\epsilon}_R)}{N \lambda L_c} \quad (1-3-13)$$

由式 (1-3-13) 可知磨损系数与微凸体接触间隔与裂缝间隔成反比。裂缝深度 d 由裂缝集聚状况确定。如前面讨论过的, 由于较大静压力在正对微凸体接触处的下面存在, 紧靠近表面处不会集聚裂缝。在两相金属中, 硬颗粒的位置与基体塑性变形场在一个给定组表面牵引力下控制了准确的裂缝集聚部位。这些空洞集聚在次表面层区的范围内。一旦集聚, 这些空洞由于塑性变形而伸长, 然后在随后的加载循环时延伸。

摩擦对磨损的影响可以用分析弹塑性固体的塑性变形、裂缝集聚与延伸的方法分析, 但这样做将会遇到大量数值计算问题, 比较简单的近似解法可按式 (1-3-10) 计算出裂缝增长 Δc :

$$\Delta c = (a\mu)^n$$

式中 μ —— 摩擦系数;

a —— 微凸体接触长度之半;

n —— 常数, 对典型疲劳加载状态下的大多数金属, $n = 2 \sim 4$ 。

例 有一对试样与滑块在载荷 10N 作用下, 裂缝深度 d 为 $5\mu\text{m}$ 处 Δc_L 与 Δc_R 为 $0.0035\mu\text{m}$, 表观接触长度 ΔL 为 2mm , 硬度为 1000MPa , 假定微凸体接触间隔 λ 与裂缝间隔 l_c 均为 $100\mu\text{m}$, 求磨损率 V/l 与磨损系数 K 。

由式 (1-3-10),

$$\begin{aligned} \frac{V}{l} &= \frac{(2 \times 10^{-3})^2 (5 \times 10^{-6}) (0.0035 \times 10^{-6} + 0.0035 \times 10^{-6})}{(100 \times 10^{-6}) (100 \times 10^{-6})} \\ &= 1.4 \times 10^{-11} (\text{m}^3/\text{m}) \end{aligned}$$

由式 (1-3-13),

$$\begin{aligned} K &= \frac{HV}{Nl} = \frac{1000 \times 10^6 \times 1.4 \times 10^{-11}}{10} \\ &= 1.4 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

按照试验数据 K 为 10^{-2} 至 10^{-4} , 比较准确地与计算结果近似。由此可见剥层磨损是较好的磨损模型。

5. 腐蚀磨损

金属表面在摩擦过程中, 与周围介质在化学与电化学反应作用下产生的磨损过程称为腐蚀磨损。腐蚀磨损与前面所述几种形式磨损的最大不同在于, 它的产生是由于第三者—环境介质的作用, 包括润滑介质的作用, 潮湿空气中的氧、二氧化硫、硫化氢及二氧化碳等均可引起腐蚀磨损。在表面接触过程中, 露出表面材料与环境介质发生化学反应而产生污染膜。在作相对运动的表面摩擦时可能将污染膜去除, 随后又重新产生新的污染膜。如此周而复始, 不断发生磨损。常用的钢铁与铝合金等极易与空气中的氧反应而生成氧化膜, 当氧化膜韧性高, 与基体连结的抗剪强度较高, 或者氧化速度高于磨损率时, 氧化膜能起减摩耐磨作用。反之脆性氧化膜, 与基体连结的抗剪强度较低, 或者氧化速度低于磨损率时, 其磨损量较大。

另一类腐蚀磨损是金属表面直接与环境介质中的成分直接反应生成化合物。此外两个相互接触的金属偶的相对电位, 会对腐蚀磨损有影响。润滑油中含有某些活性元素 (如硫以及其它酸性物质) 也会对摩擦表面 (特别是轴承合金表面) 造成腐蚀磨损。变质的润滑油中的淤渣和手汗等对金属的污染也会引起腐蚀磨损。

图1-3-9所示为腐蚀磨损的一般过程。

通常可使用润滑油或防锈油防止金属表面的腐蚀磨损, 也可采用耐蚀材料或表面耐蚀涂层, 注意保护摩擦表面, 使之不受有害环境介质的影响。

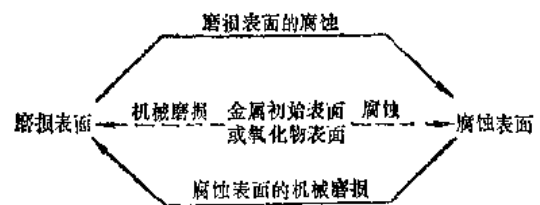


图1-3-9 腐蚀磨损的一般过程

6. 微动磨损

两个作微小振幅 (几十微米) 重复摆动的接触表面所产生的磨损, 称为微动磨损。微动磨损是一种粘附磨损、腐蚀磨损和磨料磨损并存的复合磨损形式。

微动磨损的主要特点是接触表面分成两部分, 在接触表面的中心区将产生较高接触压力, 摩擦可能会高到足以阻止滑动, 而其周围区域接触压力与摩擦较低, 将会发生滑移。这种粘-滑状况表现为

微小位移的微动磨损。在粘附区将随着所作用的切向力的增加而收缩，在粘滑边界区将出现应力峰值（取决于其与滑动方向的位置而为拉、剪切或压应力），使接合面上实际承载微凸体峰顶塑性变形，产生粘附。微振幅摆动将粘附结点剪切脱落，露出基体金属表面，这些初生表面和脱落的颗粒与大气中的氧发生反应而被氧化，生成红褐色的氧化铁，这些氧化物颗粒留在接合面上起着磨料作用，引起磨料磨损。当切向力反复作用时，在接触区内形成应力的反复作用，使疲劳裂纹集聚与增长，最终导致表面完全破坏。因此微动磨损的出现，常常是在接触表面产生点蚀的同时，有被氧化的磨屑积存而得到证实。

微动磨损常发生在名义上静止但相互间有微幅摆动运动的摩擦副上，例如飞机的机翼操纵绳换向机构上的滚动轴承，皮带无级变速器上活动带盘的花键孔接合面，以及一些受振动影响的机械（如行走机械和车辆）的螺钉联接的螺纹接合面、片式离合器内外片的接合面上，搭接接合，发动机底座，金属静密封等等。

研究证明，摩擦副材料配对是影响微动磨损的重要因素，抗粘附磨损性能好的材料常常也具有较好的抗微动磨损性能。提高表面硬度，采用适当表面处理如硫化处理以及某些专门的涂层处理，可以减轻微动磨损。周围空气相对湿度大于50%时，表面会形成 $Fe_2O_3 \cdot H_2O$ 薄膜，也可以减轻微动磨损。此外使用含二硫化钼与二硫化钙及极压剂的润滑剂等，同样可以降低微动磨损。

7. 其他磨损

除了以上几种磨损类型及理论以外，下面简介几种常会遇到的磨损形式和磨损机理。

(1) 浸蚀 (Erosion) 通常浸蚀是由于固体、液体、气体、含有硬固体颗粒的液体或气体与固体相对运动时对固体表面的冲蚀作用而产生的磨损。通常浸蚀磨损的机理是由冲击应力造成的表面疲劳破坏和(或)磨料磨损，但液体的化学和电化学反应加速了浸蚀的破坏作用，这种作用或是使表面脆裂，或是使屈服应力降低。反之当这种化学作用使表面韧性提高时将降低浸蚀磨损。

浸蚀的类型很多，如颗粒浸蚀、液体浸蚀、电浸蚀、冲击浸蚀、化学浸蚀、腐蚀浸蚀、热浸蚀以及气蚀等，下面再简介一下气蚀的机理，它与浸蚀在机理上有较大差异。

(2) 气蚀 (Cavitation Erosion) 又称气穴侵蚀，是指固体与液体相对运动时，由于液体中气泡在固体表面附近破裂时产生局部高冲击压力或局部高温引起的磨损。

浸蚀与气蚀常发生在水泵零件、水轮机或汽轮机叶片、船舶螺旋桨、喷砂机零件、输送燃料的管道等表面，雨水浸蚀对表面的浸蚀也会造成损伤。

(3) 聚合物的磨损 据参考文献介绍，聚合物的滑动磨损机理与金属相似，即由于硬颗粒或硬表面微凸体的犁制作用，在接触表面间的粘附作用以及微凸体的变形等引起的磨损。主要差别在于金属的变形为弹性变形而聚合物为粘弹—塑性变形，而且弹性模数与熔点较低，因而对所加载荷、温度与滑动速度较为敏感。通常其磨损容积与法向载荷、滑动速度与滑动速度的乘积成正比，而且以比压与滑动速度的乘积 Pv 值为主要参数。

(4) 陶瓷的磨损 陶瓷的磨损机理在很多方面与金属相似，所不同的是陶瓷比较脆，易于产生裂缝，导热性差，因此摩擦热不易散逸而使界面产生极高温度。陶瓷的优点是强度与硬度较高，耐热，化学稳定性好。

(5) 第三体磨损 第三体磨损理论认为两相对运动表面接触时，磨屑首先由两表面之一的第一体脱落，过些时候在接触中又被截住，最后由通路中消失。但在多次循环的通路中有可能重新反复循环中停留在表面。这种理论的研究重点集中于界面的作用上。

(四) 磨损形式的转化

上面所讨论的磨损机理常常是作为单一类型磨损机理来考虑的，实际上在对某一具体磨损状况进行分析，以便确定其磨损类型和进行失效分析时，往往要考虑多种因素的相互作用，利用系统分析的方法对工作变量和系统的结构进行分析，包括以下内容：

(1) 工作变量的分析 包括运动类型(如滑动、滚动、摆动等)、载荷、速度、温度(或温升)、行程或运动距离、工作持续时间及干扰(如振动及辐射等)等工作变量的分析。

(2) 系统结构的分析 包括确定在磨损过程中参与系统中的部件材料及表面处理、硬度、尺寸、表面粗糙度等；分析表面接触时的相互作用的主要特性，摩擦、磨损与润滑状况，是以粘附作用

还是机械作用为主，应变类型是弹性变形还是塑性变形，载荷特性与表层变化特性等；此外还要分析各部件的相关特性。

当工作变量或环境条件改变时，往往会发生磨损形式的转化。因此需要了解表征磨损形式转化的临界点参数，以便掌握磨损形式转化的规律。一般和磨损形式转化有关的临界状态有如下几种：

- (1) 由表面弹性变形过渡到塑性变形或破坏；
- (2) 由表面塑性挤压过渡到微观切削或胶合；
- (3) 由于固体结构的改变而产生表面层的“犁沟”现象；
- (4) 由表面层的固相焊合过渡到涂抹及材料转移；
- (5) 由形成吸附膜过渡到形成反应产物或膜的破坏。

关于不同磨损机理的转化，上面讨论过的微动磨损就是一例，由于表面疲劳及腐蚀而产生的磨损产物，在微小振幅摆动过程中被剪切脱落，这些硬的磨屑又对表面进行微观切削而转化为磨料磨损。

(五) 解决摩擦学问题的一般方法

在解决生产实际中存在的摩擦学问题，首先要进行磨损失效分析，准确判断发生磨损失效的原因，并分析零部件设计与运行情况的合理性。如观察磨损表面损伤情况、颜色、粘附颗粒，收集磨屑及润滑油中淤渣，对表面和润滑剂的组成进行化学分析和金相检验，对照工作变量与系统结构分析确定磨损失效的主要形式和原因以及对策。一般而言，磨损失效的常见原因有以下几方面：

- (1) 摩擦副材料（包括表面膜）或润滑剂选择不当；
- (2) 零部件设计不合理；
- (3) 使用不当，工况条件超过设计参数所规定的允许值；
- (4) 系统工作不正常，润滑不当或润滑油受到污染与变质；

解决摩擦学问题的一般方法有以下几方面：

- (1) 选择适当的材料及表面膜 摩擦副配材料及表面膜的选择，需要对不同因素进行综合考虑，权衡利弊。表 1-3-2 是一些材料的摩擦系数与磨损率。

表1-3-2 一些材料的摩擦系数与磨损率

材 料	摩擦系数	磨损率 ($10^{-12}\text{cm}^3/\text{cm}$)
软钢对软钢	0.62	157000
黄铜对工具钢	0.24	24000
聚四氟乙烯对工具钢	0.18	2000
钨钴合金对工具钢	0.60	320
不锈钢对工具钢	0.53	270
聚乙烯对工具钢	0.05	30
碳化钨对碳化钨	0.35	2

从表1-3-2的数据可以看到，配对摩擦副的摩擦系数与磨损率之间并不成正比关系，即摩擦系数低的摩擦副材料的磨损率有时却高于摩擦系数高的材料。

固体表面上的薄膜，如各种与金属起化学反应的润滑剂膜或镀层等，在摩擦副接触时提供衬层，通过膜的滑动剪切而降低界面处的摩擦与磨损。

(2) 转换摩擦方式 如使用球、滚柱或其他形状的滚动元件可将两固体表面的滑动接触转换成滚动接触，降低了摩擦与磨损。

(3) 合理设计润滑方法和系统 如使用带压力的润滑流体（包括空气）膜将摩擦表面完全隔开，避开表面间接触，并将固体表面间的外摩擦转换成流体膜分子之间的内摩擦，而降低表面间的摩擦。常用带有压力的润滑方法有流体动压润滑和流体静压润滑。

(4) 使用弹性体材料或其他材料 如在两表面间连接一个弹性体或可挠金属板、带，在表面发生相对运动时伴随着产生弹性体的变形，因而可以限制表面间支承的负荷。常用于作小振幅往复运动部件，例如车辆悬挂系统中。

还可以使用静电或磁力场如磁力轴承、密封那样的方法，减轻表面间的载荷，使之容易在纵向移动。

以上方法可以同时使用两种或更多种方法。如在使用流体动压润滑的支承元件中，由于运动起始与停止瞬间滑动速度较低，易于产生表面直接接触而造成损伤，可以选择适当的轴承合金或是在润滑油中添加极压润滑添加剂，在表面上形成极压膜以防止损伤。除此而外，在使用时可以根据已发生的失效原因和系统工作情况，调整工况条件，消除污染源或清洗过滤器，更换已损零件及变质的润滑剂，来改善系统工作情况。

参 考 文 献

- [1] 中国机械工程学会 摩擦学学会. 润滑工程. 北京: 机械工业出版社, 1986
- [2] [德] 霍斯特·契可斯. 摩擦学. 刘钟华等译. 北京: 机械工业出版社, 1984
- [3] [苏] 克拉盖尔斯基 M B 等. 摩擦磨损计算原理. 江一麟等译. 北京: 机械工业出版社, 1982
- [4] 戴雄杰等. 摩擦学基础. 上海: 上海科学技术出版社, 1984
- [5] [英] 霍林 J 等. 摩擦学原理. 上海交通大学摩擦学研究室译. 北京: 机械工业出版社, 1981
- [6] [英] 鲍登 F P, 泰博 D. 固体的摩擦与润滑及其续篇. 陈绍洋等译. 北京: 机械工业出版社, 1982, 1986
- [7] Suh Nam P. Tribophysics. New Jersey; Prentice-Hall, Inc. 1986
- [8] Peterson M B et al. Wearcontrol Handbook. New York; ASME. 1980
- [9] Czichos H. Importance of Properties of Solids to Friction and Wear Behaviour. In: New Directions in Lubrication, Materials, Wear, and Surface Interactions. New Jersey; Noyes Publ. 1985. 68~113
- [10] Zum Gahr K. -H. Microstructure and Wear of Materials. Amsterdam; Elsevier, 1987
- [11] [苏] 克拉盖尔斯基等主编. 摩擦、磨损与润滑手册. 余梦生等译. 北京: 机械工业出版社, 1985

参 考 文 献

- [1] 中国机械工程学会 摩擦学学会. 润滑工程. 北京: 机械工业出版社, 1986
- [2] [德] 霍斯特·契可斯. 摩擦学. 刘钟华等译. 北京: 机械工业出版社, 1984
- [3] [苏] 克拉盖尔斯基 M B 等. 摩擦磨损计算原理. 江一麟等译. 北京: 机械工业出版社, 1982
- [4] 戴雄杰等. 摩擦学基础. 上海: 上海科学技术出版社, 1984
- [5] [英] 霍林 J 等. 摩擦学原理. 上海交通大学摩擦学研究室译. 北京: 机械工业出版社, 1981
- [6] [英] 鲍登 F P, 泰博 D. 固体的摩擦与润滑及其续篇. 陈绍洋等译. 北京: 机械工业出版社, 1982, 1986
- [7] Suh Nam P. Tribophysics. New Jersey; Prentice-Hall, Inc. 1986
- [8] Peterson M B et al. Wearcontrol Handbook. New York; ASME. 1980
- [9] Czichos H. Importance of Properties of Solids to Friction and Wear Behaviour. In: New Directions in Lubrication, Materials, Wear, and Surface Interactions. New Jersey; Noyes Publ. 1985. 68~113
- [10] Zum Gahr K. -H. Microstructure and Wear of Materials. Amsterdam; Elsevier, 1987
- [11] [苏] 克拉盖尔斯基等主编. 摩擦、磨损与润滑手册. 余梦生等译. 北京: 机械工业出版社, 1985

参 考 文 献

- [1] 中国机械工程学会 摩擦学学会. 润滑工程. 北京: 机械工业出版社, 1986
- [2] [德] 霍斯特·契可斯. 摩擦学. 刘钟华等译. 北京: 机械工业出版社, 1984
- [3] [苏] 克拉盖尔斯基 M B 等. 摩擦磨损计算原理. 江一麟等译. 北京: 机械工业出版社, 1982
- [4] 戴雄杰等. 摩擦学基础. 上海: 上海科学技术出版社, 1984
- [5] [英] 霍林 J 等. 摩擦学原理. 上海交通大学摩擦学研究室译. 北京: 机械工业出版社, 1981
- [6] [英] 鲍登 F P, 泰博 D. 固体的摩擦与润滑及其续篇. 陈绍洋等译. 北京: 机械工业出版社, 1982, 1986
- [7] Suh Nam P. Tribophysics. New Jersey; Prentice-Hall, Inc. 1986
- [8] Peterson M B et al. Wearcontrol Handbook. New York; ASME. 1980
- [9] Czichos H. Importance of Properties of Solids to Friction and Wear Behaviour. In: New Directions in Lubrication, Materials, Wear, and Surface Interactions. New Jersey; Noyes Publ. 1985. 68~113
- [10] Zum Gahr K. -H. Microstructure and Wear of Materials. Amsterdam; Elsevier, 1987
- [11] [苏] 克拉盖尔斯基等主编. 摩擦、磨损与润滑手册. 余梦生等译. 北京: 机械工业出版社, 1985

参 考 文 献

- [1] 中国机械工程学会 摩擦学学会. 润滑工程. 北京: 机械工业出版社, 1986
- [2] [德] 霍斯特·契可斯. 摩擦学. 刘钟华等译. 北京: 机械工业出版社, 1984
- [3] [苏] 克拉盖尔斯基 M B 等. 摩擦磨损计算原理. 江一麟等译. 北京: 机械工业出版社, 1982
- [4] 戴雄杰等. 摩擦学基础. 上海: 上海科学技术出版社, 1984
- [5] [英] 霍林 J 等. 摩擦学原理. 上海交通大学摩擦学研究室译. 北京: 机械工业出版社, 1981
- [6] [英] 鲍登 F P, 泰博 D. 固体的摩擦与润滑及其续篇. 陈绍洋等译. 北京: 机械工业出版社, 1982, 1986
- [7] Suh Nam P. Tribophysics. New Jersey; Prentice-Hall, Inc. 1986
- [8] Peterson M B et al. Wearcontrol Handbook. New York; ASME. 1980
- [9] Czichos H. Importance of Properties of Solids to Friction and Wear Behaviour. In: New Directions in Lubrication, Materials, Wear, and Surface Interactions. New Jersey; Noyes Publ. 1985. 68~113
- [10] Zum Gahr K. -H. Microstructure and Wear of Materials. Amsterdam; Elsevier, 1987
- [11] [苏] 克拉盖尔斯基等主编. 摩擦、磨损与润滑手册. 余梦生等译. 北京: 机械工业出版社, 1985

参 考 文 献

- [1] 中国机械工程学会 摩擦学学会. 润滑工程. 北京: 机械工业出版社, 1986
- [2] [德] 霍斯特·契可斯. 摩擦学. 刘钟华等译. 北京: 机械工业出版社, 1984
- [3] [苏] 克拉盖尔斯基 M B 等. 摩擦磨损计算原理. 江一麟等译. 北京: 机械工业出版社, 1982
- [4] 戴雄杰等. 摩擦学基础. 上海: 上海科学技术出版社, 1984
- [5] [英] 霍林 J 等. 摩擦学原理. 上海交通大学摩擦学研究室译. 北京: 机械工业出版社, 1981
- [6] [英] 鲍登 F P, 泰博 D. 固体的摩擦与润滑及其续篇. 陈绍洋等译. 北京: 机械工业出版社, 1982, 1986
- [7] Suh Nam P. Tribophysics. New Jersey; Prentice-Hall, Inc. 1986
- [8] Peterson M B et al. Wearcontrol Handbook. New York; ASME. 1980
- [9] Czichos H. Importance of Properties of Solids to Friction and Wear Behaviour. In: New Directions in Lubrication, Materials, Wear, and Surface Interactions. New Jersey; Noyes Publ. 1985. 68~113
- [10] Zum Gahr K. -H. Microstructure and Wear of Materials. Amsterdam; Elsevier, 1987
- [11] [苏] 克拉盖尔斯基等主编. 摩擦、磨损与润滑手册. 余梦生等译. 北京: 机械工业出版社, 1985

参 考 文 献

- [1] 中国机械工程学会 摩擦学学会. 润滑工程. 北京: 机械工业出版社, 1986
- [2] [德] 霍斯特·契可斯. 摩擦学. 刘钟华等译. 北京: 机械工业出版社, 1984
- [3] [苏] 克拉盖尔斯基 M B 等. 摩擦磨损计算原理. 江一麟等译. 北京: 机械工业出版社, 1982
- [4] 戴雄杰等. 摩擦学基础. 上海: 上海科学技术出版社, 1984
- [5] [英] 霍林 J 等. 摩擦学原理. 上海交通大学摩擦学研究室译. 北京: 机械工业出版社, 1981
- [6] [英] 鲍登 F P, 泰博 D. 固体的摩擦与润滑及其续篇. 陈绍洋等译. 北京: 机械工业出版社, 1982, 1986
- [7] Suh Nam P. Tribophysics. New Jersey; Prentice-Hall, Inc. 1986
- [8] Peterson M B et al. Wearcontrol Handbook. New York; ASME. 1980
- [9] Czichos H. Importance of Properties of Solids to Friction and Wear Behaviour. In: New Directions in Lubrication, Materials, Wear, and Surface Interactions. New Jersey; Noyes Publ. 1985. 68~113
- [10] Zum Gahr K. -H. Microstructure and Wear of Materials. Amsterdam; Elsevier, 1987
- [11] [苏] 克拉盖尔斯基等主编. 摩擦、磨损与润滑手册. 余梦生等译. 北京: 机械工业出版社, 1985

参 考 文 献

- [1] 中国机械工程学会 摩擦学学会. 润滑工程. 北京: 机械工业出版社, 1986
- [2] [德] 霍斯特·契可斯. 摩擦学. 刘钟华等译. 北京: 机械工业出版社, 1984
- [3] [苏] 克拉盖尔斯基 M B 等. 摩擦磨损计算原理. 江一麟等译. 北京: 机械工业出版社, 1982
- [4] 戴雄杰等. 摩擦学基础. 上海: 上海科学技术出版社, 1984
- [5] [英] 霍林 J 等. 摩擦学原理. 上海交通大学摩擦学研究室译. 北京: 机械工业出版社, 1981
- [6] [英] 鲍登 F P, 泰博 D. 固体的摩擦与润滑及其续篇. 陈绍洋等译. 北京: 机械工业出版社, 1982, 1986
- [7] Suh Nam P. Tribophysics. New Jersey; Prentice-Hall, Inc. 1986
- [8] Peterson M B et al. Wearcontrol Handbook. New York; ASME. 1980
- [9] Czichos H. Importance of Properties of Solids to Friction and Wear Behaviour. In: New Directions in Lubrication, Materials, Wear, and Surface Interactions. New Jersey; Noyes Publ. 1985. 68~113
- [10] Zum Gahr K. -H. Microstructure and Wear of Materials. Amsterdam; Elsevier, 1987
- [11] [苏] 克拉盖尔斯基等主编. 摩擦、磨损与润滑手册. 余梦生等译. 北京: 机械工业出版社, 1985

参 考 文 献

- [1] 中国机械工程学会 摩擦学学会. 润滑工程. 北京: 机械工业出版社, 1986
- [2] [德] 霍斯特·契可斯. 摩擦学. 刘钟华等译. 北京: 机械工业出版社, 1984
- [3] [苏] 克拉盖尔斯基 M B 等. 摩擦磨损计算原理. 江一麟等译. 北京: 机械工业出版社, 1982
- [4] 戴雄杰等. 摩擦学基础. 上海: 上海科学技术出版社, 1984
- [5] [英] 霍林 J 等. 摩擦学原理. 上海交通大学摩擦学研究室译. 北京: 机械工业出版社, 1981
- [6] [英] 鲍登 F P, 泰博 D. 固体的摩擦与润滑及其续篇. 陈绍洋等译. 北京: 机械工业出版社, 1982, 1986
- [7] Suh Nam P. Tribophysics. New Jersey; Prentice-Hall, Inc. 1986
- [8] Peterson M B et al. Wearcontrol Handbook. New York; ASME. 1980
- [9] Czichos H. Importance of Properties of Solids to Friction and Wear Behaviour. In: New Directions in Lubrication, Materials, Wear, and Surface Interactions. New Jersey; Noyes Publ. 1985. 68~113
- [10] Zum Gahr K. -H. Microstructure and Wear of Materials. Amsterdam; Elsevier, 1987
- [11] [苏] 克拉盖尔斯基等主编. 摩擦、磨损与润滑手册. 余梦生等译. 北京: 机械工业出版社, 1985

参 考 文 献

- [1] 中国机械工程学会 摩擦学学会. 润滑工程. 北京: 机械工业出版社, 1986
- [2] [德] 霍斯特·契可斯. 摩擦学. 刘钟华等译. 北京: 机械工业出版社, 1984
- [3] [苏] 克拉盖尔斯基 M B 等. 摩擦磨损计算原理. 江一麟等译. 北京: 机械工业出版社, 1982
- [4] 戴雄杰等. 摩擦学基础. 上海: 上海科学技术出版社, 1984
- [5] [英] 霍林 J 等. 摩擦学原理. 上海交通大学摩擦学研究室译. 北京: 机械工业出版社, 1981
- [6] [英] 鲍登 F P, 泰博 D. 固体的摩擦与润滑及其续篇. 陈绍洋等译. 北京: 机械工业出版社, 1982, 1986
- [7] Suh Nam P. Tribophysics. New Jersey; Prentice-Hall, Inc. 1986
- [8] Peterson M B et al. Wearcontrol Handbook. New York; ASME. 1980
- [9] Czichos H. Importance of Properties of Solids to Friction and Wear Behaviour. In: New Directions in Lubrication, Materials, Wear, and Surface Interactions. New Jersey; Noyes Publ. 1985. 68~113
- [10] Zum Gahr K. -H. Microstructure and Wear of Materials. Amsterdam; Elsevier, 1987
- [11] [苏] 克拉盖尔斯基等主编. 摩擦、磨损与润滑手册. 余梦生等译. 北京: 机械工业出版社, 1985

参 考 文 献

- [1] 中国机械工程学会 摩擦学学会. 润滑工程. 北京: 机械工业出版社, 1986
- [2] [德] 霍斯特·契可斯. 摩擦学. 刘钟华等译. 北京: 机械工业出版社, 1984
- [3] [苏] 克拉盖尔斯基 M B 等. 摩擦磨损计算原理. 江一麟等译. 北京: 机械工业出版社, 1982
- [4] 戴雄杰等. 摩擦学基础. 上海: 上海科学技术出版社, 1984
- [5] [英] 霍林 J 等. 摩擦学原理. 上海交通大学摩擦学研究室译. 北京: 机械工业出版社, 1981
- [6] [英] 鲍登 F P, 泰博 D. 固体的摩擦与润滑及其续篇. 陈绍洋等译. 北京: 机械工业出版社, 1982, 1986
- [7] Suh Nam P. Tribophysics. New Jersey; Prentice-Hall, Inc. 1986
- [8] Peterson M B et al. Wearcontrol Handbook. New York; ASME. 1980
- [9] Czichos H. Importance of Properties of Solids to Friction and Wear Behaviour. In: New Directions in Lubrication, Materials, Wear, and Surface Interactions. New Jersey; Noyes Publ. 1985. 68~113
- [10] Zum Gahr K. -H. Microstructure and Wear of Materials. Amsterdam; Elsevier, 1987
- [11] [苏] 克拉盖尔斯基等主编. 摩擦、磨损与润滑手册. 余梦生等译. 北京: 机械工业出版社, 1985

参 考 文 献

- [1] 中国机械工程学会 摩擦学学会. 润滑工程. 北京: 机械工业出版社, 1986
- [2] [德] 霍斯特·契可斯. 摩擦学. 刘钟华等译. 北京: 机械工业出版社, 1984
- [3] [苏] 克拉盖尔斯基 M B 等. 摩擦磨损计算原理. 江一麟等译. 北京: 机械工业出版社, 1982
- [4] 戴雄杰等. 摩擦学基础. 上海: 上海科学技术出版社, 1984
- [5] [英] 霍林 J 等. 摩擦学原理. 上海交通大学摩擦学研究室译. 北京: 机械工业出版社, 1981
- [6] [英] 鲍登 F P, 泰博 D. 固体的摩擦与润滑及其续篇. 陈绍洋等译. 北京: 机械工业出版社, 1982, 1986
- [7] Suh Nam P. Tribophysics. New Jersey; Prentice-Hall, Inc. 1986
- [8] Peterson M B et al. Wearcontrol Handbook. New York; ASME. 1980
- [9] Czichos H. Importance of Properties of Solids to Friction and Wear Behaviour. In: New Directions in Lubrication, Materials, Wear, and Surface Interactions. New Jersey; Noyes Publ. 1985. 68~113
- [10] Zum Gahr K. -H. Microstructure and Wear of Materials. Amsterdam; Elsevier, 1987
- [11] [苏] 克拉盖尔斯基等主编. 摩擦、磨损与润滑手册. 余梦生等译. 北京: 机械工业出版社, 1985

参 考 文 献

- [1] 中国机械工程学会 摩擦学学会. 润滑工程. 北京: 机械工业出版社, 1986
- [2] [德] 霍斯特·契可斯. 摩擦学. 刘钟华等译. 北京: 机械工业出版社, 1984
- [3] [苏] 克拉盖尔斯基 M B 等. 摩擦磨损计算原理. 江一麟等译. 北京: 机械工业出版社, 1982
- [4] 戴雄杰等. 摩擦学基础. 上海: 上海科学技术出版社, 1984
- [5] [英] 霍林 J 等. 摩擦学原理. 上海交通大学摩擦学研究室译. 北京: 机械工业出版社, 1981
- [6] [英] 鲍登 F P, 泰博 D. 固体的摩擦与润滑及其续篇. 陈绍洋等译. 北京: 机械工业出版社, 1982, 1986
- [7] Suh Nam P. Tribophysics. New Jersey; Prentice-Hall, Inc. 1986
- [8] Peterson M B et al. Wearcontrol Handbook. New York; ASME. 1980
- [9] Czichos H. Importance of Properties of Solids to Friction and Wear Behaviour. In: New Directions in Lubrication, Materials, Wear, and Surface Interactions. New Jersey; Noyes Publ. 1985. 68~113
- [10] Zum Gahr K. -H. Microstructure and Wear of Materials. Amsterdam; Elsevier, 1987
- [11] [苏] 克拉盖尔斯基等主编. 摩擦、磨损与润滑手册. 余梦生等译. 北京: 机械工业出版社, 1985

参 考 文 献

- [1] 中国机械工程学会 摩擦学学会. 润滑工程. 北京: 机械工业出版社, 1986
- [2] [德] 霍斯特·契可斯. 摩擦学. 刘钟华等译. 北京: 机械工业出版社, 1984
- [3] [苏] 克拉盖尔斯基 M B 等. 摩擦磨损计算原理. 江一麟等译. 北京: 机械工业出版社, 1982
- [4] 戴雄杰等. 摩擦学基础. 上海: 上海科学技术出版社, 1984
- [5] [英] 霍林 J 等. 摩擦学原理. 上海交通大学摩擦学研究室译. 北京: 机械工业出版社, 1981
- [6] [英] 鲍登 F P, 泰博 D. 固体的摩擦与润滑及其续篇. 陈绍洋等译. 北京: 机械工业出版社, 1982, 1986
- [7] Suh Nam P. Tribophysics. New Jersey; Prentice-Hall, Inc. 1986
- [8] Peterson M B et al. Wearcontrol Handbook. New York; ASME. 1980
- [9] Czichos H. Importance of Properties of Solids to Friction and Wear Behaviour. In: New Directions in Lubrication, Materials, Wear, and Surface Interactions. New Jersey; Noyes Publ. 1985. 68~113
- [10] Zum Gahr K. -H. Microstructure and Wear of Materials. Amsterdam; Elsevier, 1987
- [11] [苏] 克拉盖尔斯基等主编. 摩擦、磨损与润滑手册. 余梦生等译. 北京: 机械工业出版社, 1985

参 考 文 献

- [1] 中国机械工程学会 摩擦学学会. 润滑工程. 北京: 机械工业出版社, 1986
- [2] [德] 霍斯特·契可斯. 摩擦学. 刘钟华等译. 北京: 机械工业出版社, 1984
- [3] [苏] 克拉盖尔斯基 M B 等. 摩擦磨损计算原理. 江一麟等译. 北京: 机械工业出版社, 1982
- [4] 戴雄杰等. 摩擦学基础. 上海: 上海科学技术出版社, 1984
- [5] [英] 霍林 J 等. 摩擦学原理. 上海交通大学摩擦学研究室译. 北京: 机械工业出版社, 1981
- [6] [英] 鲍登 F P, 泰博 D. 固体的摩擦与润滑及其续篇. 陈绍洋等译. 北京: 机械工业出版社, 1982, 1986
- [7] Suh Nam P. Tribophysics. New Jersey; Prentice-Hall, Inc. 1986
- [8] Peterson M B et al. Wearcontrol Handbook. New York; ASME. 1980
- [9] Czichos H. Importance of Properties of Solids to Friction and Wear Behaviour. In: New Directions in Lubrication, Materials, Wear, and Surface Interactions. New Jersey; Noyes Publ. 1985. 68~113
- [10] Zum Gahr K. -H. Microstructure and Wear of Materials. Amsterdam; Elsevier, 1987
- [11] [苏] 克拉盖尔斯基等主编. 摩擦、磨损与润滑手册. 余梦生等译. 北京: 机械工业出版社, 1985

参 考 文 献

- [1] 中国机械工程学会 摩擦学学会. 润滑工程. 北京: 机械工业出版社, 1986
- [2] [德] 霍斯特·契可斯. 摩擦学. 刘钟华等译. 北京: 机械工业出版社, 1984
- [3] [苏] 克拉盖尔斯基 M B 等. 摩擦磨损计算原理. 江一麟等译. 北京: 机械工业出版社, 1982
- [4] 戴雄杰等. 摩擦学基础. 上海: 上海科学技术出版社, 1984
- [5] [英] 霍林 J 等. 摩擦学原理. 上海交通大学摩擦学研究室译. 北京: 机械工业出版社, 1981
- [6] [英] 鲍登 F P, 泰博 D. 固体的摩擦与润滑及其续篇. 陈绍洋等译. 北京: 机械工业出版社, 1982, 1986
- [7] Suh Nam P. Tribophysics. New Jersey; Prentice-Hall, Inc. 1986
- [8] Peterson M B et al. Wearcontrol Handbook. New York; ASME. 1980
- [9] Czichos H. Importance of Properties of Solids to Friction and Wear Behaviour. In: New Directions in Lubrication, Materials, Wear, and Surface Interactions. New Jersey; Noyes Publ. 1985. 68~113
- [10] Zum Gahr K. -H. Microstructure and Wear of Materials. Amsterdam; Elsevier, 1987
- [11] [苏] 克拉盖尔斯基等主编. 摩擦、磨损与润滑手册. 余梦生等译. 北京: 机械工业出版社, 1985

参 考 文 献

- [1] 中国机械工程学会 摩擦学学会. 润滑工程. 北京: 机械工业出版社, 1986
- [2] [德] 霍斯特·契可斯. 摩擦学. 刘钟华等译. 北京: 机械工业出版社, 1984
- [3] [苏] 克拉盖尔斯基 M B 等. 摩擦磨损计算原理. 江一麟等译. 北京: 机械工业出版社, 1982
- [4] 戴雄杰等. 摩擦学基础. 上海: 上海科学技术出版社, 1984
- [5] [英] 霍林 J 等. 摩擦学原理. 上海交通大学摩擦学研究室译. 北京: 机械工业出版社, 1981
- [6] [英] 鲍登 F P, 泰博 D. 固体的摩擦与润滑及其续篇. 陈绍洋等译. 北京: 机械工业出版社, 1982, 1986
- [7] Suh Nam P. Tribophysics. New Jersey; Prentice-Hall, Inc. 1986
- [8] Peterson M B et al. Wearcontrol Handbook. New York; ASME. 1980
- [9] Czichos H. Importance of Properties of Solids to Friction and Wear Behaviour. In: New Directions in Lubrication, Materials, Wear, and Surface Interactions. New Jersey; Noyes Publ. 1985. 68~113
- [10] Zum Gahr K. -H. Microstructure and Wear of Materials. Amsterdam; Elsevier, 1987
- [11] [苏] 克拉盖尔斯基等主编. 摩擦、磨损与润滑手册. 余梦生等译. 北京: 机械工业出版社, 1985

参 考 文 献

- [1] 中国机械工程学会 摩擦学学会. 润滑工程. 北京: 机械工业出版社, 1986
- [2] [德] 霍斯特·契可斯. 摩擦学. 刘钟华等译. 北京: 机械工业出版社, 1984
- [3] [苏] 克拉盖尔斯基 M B 等. 摩擦磨损计算原理. 江一麟等译. 北京: 机械工业出版社, 1982
- [4] 戴雄杰等. 摩擦学基础. 上海: 上海科学技术出版社, 1984
- [5] [英] 霍林 J 等. 摩擦学原理. 上海交通大学摩擦学研究室译. 北京: 机械工业出版社, 1981
- [6] [英] 鲍登 F P, 泰博 D. 固体的摩擦与润滑及其续篇. 陈绍洋等译. 北京: 机械工业出版社, 1982, 1986
- [7] Suh Nam P. Tribophysics. New Jersey; Prentice-Hall, Inc. 1986
- [8] Peterson M B et al. Wearcontrol Handbook. New York; ASME. 1980
- [9] Czichos H. Importance of Properties of Solids to Friction and Wear Behaviour. In: New Directions in Lubrication, Materials, Wear, and Surface Interactions. New Jersey; Noyes Publ. 1985. 68~113
- [10] Zum Gahr K. -H. Microstructure and Wear of Materials. Amsterdam; Elsevier, 1987
- [11] [苏] 克拉盖尔斯基等主编. 摩擦、磨损与润滑手册. 余梦生等译. 北京: 机械工业出版社, 1985

参 考 文 献

- [1] 中国机械工程学会 摩擦学学会. 润滑工程. 北京: 机械工业出版社, 1986
- [2] [德] 霍斯特·契可斯. 摩擦学. 刘钟华等译. 北京: 机械工业出版社, 1984
- [3] [苏] 克拉盖尔斯基 M B 等. 摩擦磨损计算原理. 江一麟等译. 北京: 机械工业出版社, 1982
- [4] 戴雄杰等. 摩擦学基础. 上海: 上海科学技术出版社, 1984
- [5] [英] 霍林 J 等. 摩擦学原理. 上海交通大学摩擦学研究室译. 北京: 机械工业出版社, 1981
- [6] [英] 鲍登 F P, 泰博 D. 固体的摩擦与润滑及其续篇. 陈绍洋等译. 北京: 机械工业出版社, 1982, 1986
- [7] Suh Nam P. Tribophysics. New Jersey; Prentice-Hall, Inc. 1986
- [8] Peterson M B et al. Wearcontrol Handbook. New York; ASME. 1980
- [9] Czichos H. Importance of Properties of Solids to Friction and Wear Behaviour. In: New Directions in Lubrication, Materials, Wear, and Surface Interactions. New Jersey; Noyes Publ. 1985. 68~113
- [10] Zum Gahr K. -H. Microstructure and Wear of Materials. Amsterdam; Elsevier, 1987
- [11] [苏] 克拉盖尔斯基等主编. 摩擦、磨损与润滑手册. 余梦生等译. 北京: 机械工业出版社, 1985

参 考 文 献

- [1] 中国机械工程学会 摩擦学学会. 润滑工程. 北京: 机械工业出版社, 1986
- [2] [德] 霍斯特·契可斯. 摩擦学. 刘钟华等译. 北京: 机械工业出版社, 1984
- [3] [苏] 克拉盖尔斯基 M B 等. 摩擦磨损计算原理. 江一麟等译. 北京: 机械工业出版社, 1982
- [4] 戴雄杰等. 摩擦学基础. 上海: 上海科学技术出版社, 1984
- [5] [英] 霍林 J 等. 摩擦学原理. 上海交通大学摩擦学研究室译. 北京: 机械工业出版社, 1981
- [6] [英] 鲍登 F P, 泰博 D. 固体的摩擦与润滑及其续篇. 陈绍洋等译. 北京: 机械工业出版社, 1982, 1986
- [7] Suh Nam P. Tribophysics. New Jersey; Prentice-Hall, Inc. 1986
- [8] Peterson M B et al. Wearcontrol Handbook. New York; ASME. 1980
- [9] Czichos H. Importance of Properties of Solids to Friction and Wear Behaviour. In: New Directions in Lubrication, Materials, Wear, and Surface Interactions. New Jersey; Noyes Publ. 1985. 68~113
- [10] Zum Gahr K. -H. Microstructure and Wear of Materials. Amsterdam; Elsevier, 1987
- [11] [苏] 克拉盖尔斯基等主编. 摩擦、磨损与润滑手册. 余梦生等译. 北京: 机械工业出版社, 1985

参 考 文 献

- [1] 中国机械工程学会 摩擦学学会. 润滑工程. 北京: 机械工业出版社, 1986
- [2] [德] 霍斯特·契可斯. 摩擦学. 刘钟华等译. 北京: 机械工业出版社, 1984
- [3] [苏] 克拉盖尔斯基 M B 等. 摩擦磨损计算原理. 江一麟等译. 北京: 机械工业出版社, 1982
- [4] 戴雄杰等. 摩擦学基础. 上海: 上海科学技术出版社, 1984
- [5] [英] 霍林 J 等. 摩擦学原理. 上海交通大学摩擦学研究室译. 北京: 机械工业出版社, 1981
- [6] [英] 鲍登 F P, 泰博 D. 固体的摩擦与润滑及其续篇. 陈绍洋等译. 北京: 机械工业出版社, 1982, 1986
- [7] Suh Nam P. Tribophysics. New Jersey; Prentice-Hall, Inc. 1986
- [8] Peterson M B et al. Wearcontrol Handbook. New York; ASME. 1980
- [9] Czichos H. Importance of Properties of Solids to Friction and Wear Behaviour. In: New Directions in Lubrication, Materials, Wear, and Surface Interactions. New Jersey; Noyes Publ. 1985. 68~113
- [10] Zum Gahr K. -H. Microstructure and Wear of Materials. Amsterdam; Elsevier, 1987
- [11] [苏] 克拉盖尔斯基等主编. 摩擦、磨损与润滑手册. 余梦生等译. 北京: 机械工业出版社, 1985

参 考 文 献

- [1] 中国机械工程学会 摩擦学学会. 润滑工程. 北京: 机械工业出版社, 1986
- [2] [德] 霍斯特·契可斯. 摩擦学. 刘钟华等译. 北京: 机械工业出版社, 1984
- [3] [苏] 克拉盖尔斯基 M B 等. 摩擦磨损计算原理. 江一麟等译. 北京: 机械工业出版社, 1982
- [4] 戴雄杰等. 摩擦学基础. 上海: 上海科学技术出版社, 1984
- [5] [英] 霍林 J 等. 摩擦学原理. 上海交通大学摩擦学研究室译. 北京: 机械工业出版社, 1981
- [6] [英] 鲍登 F P, 泰博 D. 固体的摩擦与润滑及其续篇. 陈绍洋等译. 北京: 机械工业出版社, 1982, 1986
- [7] Suh Nam P. Tribophysics. New Jersey; Prentice-Hall, Inc. 1986
- [8] Peterson M B et al. Wearcontrol Handbook. New York; ASME. 1980
- [9] Czichos H. Importance of Properties of Solids to Friction and Wear Behaviour. In: New Directions in Lubrication, Materials, Wear, and Surface Interactions. New Jersey; Noyes Publ. 1985. 68~113
- [10] Zum Gahr K. -H. Microstructure and Wear of Materials. Amsterdam; Elsevier, 1987
- [11] [苏] 克拉盖尔斯基等主编. 摩擦、磨损与润滑手册. 余梦生等译. 北京: 机械工业出版社, 1985

参 考 文 献

- [1] 中国机械工程学会 摩擦学学会. 润滑工程. 北京: 机械工业出版社, 1986
- [2] [德] 霍斯特·契可斯. 摩擦学. 刘钟华等译. 北京: 机械工业出版社, 1984
- [3] [苏] 克拉盖尔斯基 M B 等. 摩擦磨损计算原理. 江一麟等译. 北京: 机械工业出版社, 1982
- [4] 戴雄杰等. 摩擦学基础. 上海: 上海科学技术出版社, 1984
- [5] [英] 霍林 J 等. 摩擦学原理. 上海交通大学摩擦学研究室译. 北京: 机械工业出版社, 1981
- [6] [英] 鲍登 F P, 泰博 D. 固体的摩擦与润滑及其续篇. 陈绍洋等译. 北京: 机械工业出版社, 1982, 1986
- [7] Suh Nam P. Tribophysics. New Jersey; Prentice-Hall, Inc. 1986
- [8] Peterson M B et al. Wearcontrol Handbook. New York; ASME. 1980
- [9] Czichos H. Importance of Properties of Solids to Friction and Wear Behaviour. In: New Directions in Lubrication, Materials, Wear, and Surface Interactions. New Jersey; Noyes Publ. 1985. 68~113
- [10] Zum Gahr K. -H. Microstructure and Wear of Materials. Amsterdam; Elsevier, 1987
- [11] [苏] 克拉盖尔斯基等主编. 摩擦、磨损与润滑手册. 余梦生等译. 北京: 机械工业出版社, 1985