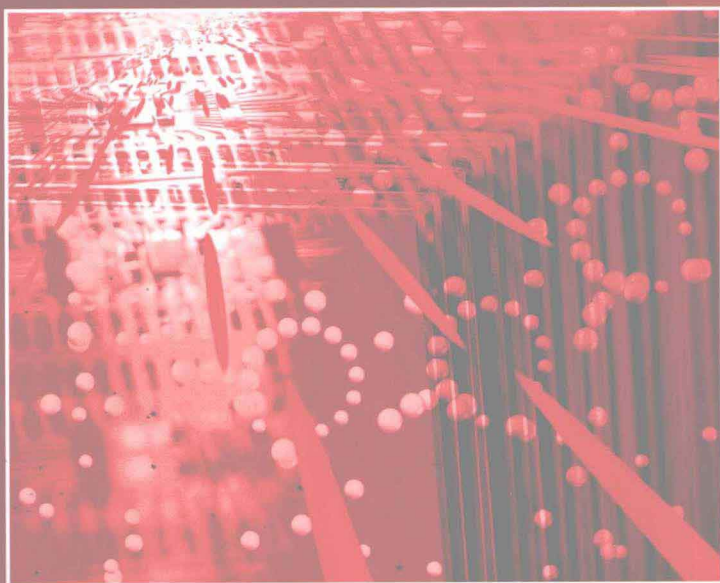


机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目

# 切削液技术

刘镇昌 编著



机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目

# 切削液技术

刘镇昌 编著



机械工业出版社

本书以国内外学者的大量试验结果为依据,结合作者自己的研究心得和学术观点,系统地讲述了切削液的基本理论和应用技术。本书主要内容  
包括摩擦学与切削加工学基础知识、切削液的种类与组成、切削液基础油  
与添加剂、切削液的性能与评价、切削液的作用及其机理、切削液的供液  
方法与效果、切削液的选择与应用、切削液的配制与管理、切削液技术  
的新进展以及切削液常见故障分析与对策。写作风格力求简明扼要,突出  
实用性。

本书主要面向制造、销售、使用切削液的工程技术人员、管理人员和  
操作人员;对从事切削液研究的青年科技工作者以及相关专业的教师、研  
究生和大专院校学生也颇有参考价值。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

切削液技术/刘镇昌编著. —北京:机械工业出版社, 2008. 9

机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目

ISBN 978-7-111-25016-6

I. 切… II. 刘… III. 切削液 - 研究 IV. TG501.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 133056 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:高文龙 责任编辑:高文龙 游焱兵 版式设计:霍永明

责任校对:李秋荣 封面设计:张 静 责任印制:乔 宇

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2009 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 19.25 印张 · 476 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-25016-6

定价: 40.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379711

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

切削液是切削加工过程中应用十分广泛的一类工艺用油（液）。人类使用切削液的历史可以追溯到远古时代。那时，人们已经知道在磨制石器、铜器、铁器时用浇水的方法来提高效率和质量。动植物油脂是最先被使用的天然油性润滑剂。18 世纪中后期以来，切削液在各种金属加工领域中得到了广泛的应用。但直至 20 世纪初，人们能够从原油中提炼出大量润滑油，特别是发明了各种润滑油添加剂以来，才真正拉开了现代切削液技术的历史序幕。经过一个多世纪的发展，切削液在制造业中的应用已经十分广泛。

从历史上看，切削液技术的发展总是依赖于润滑油科学的进步，无论是理论体系、研究方法、实验手段还是具体的油料、添加剂等，大都是仿效或借鉴润滑油科学中的成果。本书亦不能脱离这种现实，但竭力提示读者注意切削油（液）与润滑油（剂）之间的联系和区别，希望通过业内人士的共同努力，逐步构建切削液自身的学科体系。

现代切削液技术涉及切削加工学、油脂化学、表面活性剂科学、摩擦磨损与润滑科学、劳动卫生与环境科学等多门学科，研究难度大，存在问题多；而同时熟悉上述各门学科的通才颇为罕见。制造企业普遍缺乏懂得切削液的工艺技术人员。因此，经常发生各种与切削液相关的工艺技术问题。作者曾在制造企业长期从事切削加工现场技术工作，近二十余年又在学校开展切削液技术的研究，对此有亲身体会。因此，一直希望为切削液用户写一本实用小册子。在常年积累的基础上，写成了《金属切削液——选择、配制与使用》一书，并于 2007 年 9 月出版发行。本书在《金属切削液——选择、配制与使用》的基础上就知识面的广度方面进行了扩展，增加了切削液的基础油与添加剂、切削液的作用及其机理、切削液供液方法与效果、切削液技术的新进展等章节；在内容的深度上也有所提升；适合于更加广泛的读者群体。

本书以国内外学者大量的试验结果为依据，结合自己的研究心得和学术观点，力图全面、系统地介绍切削液的相关理论知识和应用技术。写作风格力求严谨、简明，突出实用性。本书引述的观点、数据和图表一律注明出处，并尽量引用原创文献；凡未查到原创文献的，则在其后注明转引文献；参考文献中亦尽量提供详细信息，以便于读者查证。

本书引用了前辈学者和当代同行大量珍贵的文献资料，于此对他们的辛勤劳动表示衷心感谢。作者特别向《切削液与磨削液》一书的原著人廣井 進先生和山中康夫先生、日本大分大学教授甲木 昭先生和松岡寛憲先生以及日本 Yushiro 化学工业技术研究所表示感谢。作者的研究工作曾得到过他们的热心指导，本书引用的许多文献资料也从他们那里获得。

鉴于作者专业领域和知识水平的局限，书中难免各种错漏，敬请读者诸君不吝赐教。

谨以此书向几十年如一日默默支持作者耕耘的沈渝女士表示诚挚的敬意。

刘镇昌

山东济南

2008 年 5 月

zcliu@sdu.edu.cn

# 目 录

## 前言

## 第1章 摩擦学与切削加工学基础

### 知识 ..... 1

- 1.1 摩擦 ..... 1
- 1.2 磨损 ..... 8
- 1.3 润滑 ..... 10
- 1.4 金属切削基本定义 ..... 13
- 1.5 切屑形成过程 ..... 18
- 1.6 切削力与切削功率 ..... 27
- 1.7 切削热与切削温度 ..... 30
- 1.8 刀具的失效与寿命理论 ..... 34
- 1.9 切削加工质量 ..... 50
- 参考文献 ..... 51

## 第2章 切削液的种类与组成 ..... 53

- 2.1 切削液的分类 ..... 53
- 2.2 切削液的组成与性能特点 ..... 57
- 2.3 各类切削液的主要特性及应用场合 ..... 65
- 参考文献 ..... 66

## 第3章 切削液基础油与添加剂 ..... 67

- 3.1 基础油 ..... 67
- 3.2 油性添加剂 ..... 68
- 3.3 极压添加剂 ..... 70
- 3.4 防锈添加剂 ..... 73
- 3.5 表面活性剂 ..... 78
- 3.6 其他添加剂 ..... 85
- 参考文献 ..... 87

## 第4章 切削液的性能与评价 ..... 89

- 4.1 切削过程的输入、输出参数及其相互关系 ..... 89
- 4.2 切削液的加工性能及其评价 ..... 91
- 4.3 切削液的理化性能及其评价 ..... 96
- 4.4 切削液的环境性能及其评价 ..... 112
- 4.5 切削液性能的综合评价 ..... 125
- 参考文献 ..... 127

## 第5章 切削液的作用及其机理 ..... 130

- 5.1 切削液的润滑作用及其机理 ..... 130
- 5.2 切削液的冷却作用及其机理 ..... 147
- 5.3 切削液的清洗作用及其机理 ..... 152
- 5.4 切削液的防腐蚀作用及其机理 ..... 154
- 参考文献 ..... 156

## 第6章 切削液的供液方法与效果 ..... 160

- 6.1 浇注供液法 ..... 160
- 6.2 压力供液法 ..... 165
- 6.3 射流供液法 ..... 176
- 6.4 喷雾供液法 ..... 179
- 6.5 其他供液法 ..... 180
- 6.6 集中供液系统 ..... 182
- 参考文献 ..... 182

## 第7章 切削液的选择与应用 ..... 184

- 7.1 各种切削液的性能比较 ..... 184
- 7.2 常用机械工程材料的切削加工性及对切削液的适应性 ..... 192
- 7.3 各种切削方式按加工性能选择切削液 ..... 199
- 7.4 选择切削液的经济性考虑 ..... 230
- 7.5 选择切削液的环境卫生因素 ..... 235
- 7.6 选择切削液的具体步骤 ..... 236
- 参考文献 ..... 237

## 第8章 切削液的配制与管理 ..... 239

- 8.1 切削液的配制 ..... 239
- 8.2 切削液的管理 ..... 245
- 8.3 切削液的净化 ..... 255
- 8.4 切削液的废液处理 ..... 264
- 参考文献 ..... 268

## 第9章 切削液技术的新进展 ..... 270

- 9.1 绿色制造与可持续发展 ..... 270
- 9.2 环境友好切削液 ..... 273
- 9.3 微量切削液加工技术 ..... 284
- 参考文献 ..... 292

## 第10章 切削液常见故障分析与对策 ..... 296

- 10.1 加工性能方面的问题 ..... 296

|                      |     |                           |     |
|----------------------|-----|---------------------------|-----|
| 10.2 理化性能方面的问题 ..... | 297 | 附录 A 合成切削液技术要求 (摘自 GB/T   |     |
| 10.3 安全卫生方面的问题 ..... | 299 | 6144—1985) .....          | 301 |
| 参考文献 .....           | 300 | 附录 B 微乳化切削液主要技术性能指标       |     |
| 附录 .....             | 301 | (摘自 JB/T 7453—1994) ..... | 302 |

# 第1章 摩擦学与切削加工学基础知识

设计制造出一台好的机器，不一定能够保证它持久地满足设计的使用要求。原因之一是机器运动部件中存在着摩擦和磨损，会使整台机器逐渐丧失其应有的性能。人所共知的解决方法是在使用中给以恰当的润滑（Lubrication）。随着工业技术的发展，润滑问题已经成为涉及摩擦磨损与润滑原理及其方法、润滑剂、表面材料、润滑系统等更广范围的学科技术。而英语中的“Lubrication”一词仅限于表示“给摩擦部分加润滑油”这样一种比较狭窄的含义。英国教育科学部在20世纪60年代设立了润滑技术委员会，对润滑问题进行了实态调查，并于1965年发表了题为“Lubrication (Tribology)”的报告。为了改变社会对与润滑相关联的科学技术的认识，该委员会创造并提议使用“Tribology”这一术语。其定义为：“Tribology is the science and technology of interacting surfaces in relative motion and of related subjects and practices.”该提议很快得到各国学术界的普遍认同。“Tribology”一词源于希腊语“Tribos”，是“摩擦”的意思，因此，中文译成“摩擦学”比较贴切。这样，原定义可译为“摩擦学是关于在相对运动中相互作用的表面及相关学科与实践的科学技术。”从定义可见，Tribology（摩擦学）包含极为广泛的学科领域，是广义的摩擦学。习惯上，它主要包括有关摩擦、磨损与润滑的科学与技术，涉及机械科学、表面科学、油脂化学、物理化学、生态科学、环境科学等诸多学科，是一门多学科交叉的边缘科学技术。

一般说来，机械加工可分为成形加工和去除加工两大类。成形加工是使工件产生塑性变形而得到所要求的工件尺寸和形状的工艺方法。成形加工一般不产生切屑，如挤压、锻压、拉拔、轧制等塑性成形加工。去除加工是从工件上去除多余材料而得到所要求的工件尺寸和形状的工艺方法。去除加工要产生切屑，如各种切削加工和磨料加工。切削加工学就是关于切削加工基本理论、实验方法及其应用的学科。

本章仅介绍狭义摩擦学和金属切削加工的基础知识。

## 1.1 摩擦

当两个相互接触的固体在外力作用下沿接触面相对运动或具有相对运动趋势时，在接触面之间就会产生运动阻力，这种阻力称为摩擦力，这种现象称为摩擦现象。

发生相对运动的零件或部件构成运动副，如：轴与轴承、齿轮啮合、机床导轨、蜗杆与蜗轮、链条与链轮、带传动等。这些运动副在相对运动时都会发生摩擦，因此我们也称这些运动副为摩擦副。在运动副中产生的摩擦同时伴随着摩擦力、摩擦热和磨损三种物理现象。

摩擦是自然界普遍存在的现象，对人们的生产与生活都有重要影响。有了摩擦人们才能走路，手指才能夹持物品，琴弦才能发音，汽车、火车才能行驶。摩擦压力机、摩擦离合器、带传动等都是利用摩擦力来传递运动和动力的。但是，摩擦也有诸多害处。摩擦消耗大量的功（机械运动中为克服摩擦力所做的功是无用功），约占总功耗的1/3，大大降低了机械效率。摩擦使零件产生磨损，表面间隙增大，运动精度降低，甚至出现振动和噪声。此

外, 机器运行中用来克服摩擦力的那部分能量转换成热能, 使机器零件温度升高, 强度降低, 甚至产生热变形、热疲劳、热磨损, 不仅影响机器的正常运转, 还会缩短机器使用寿命。据统计, 大约有 80% 的零件损坏是由于磨损造成的。学习和研究摩擦现象的本质, 掌握科学的应对措施, 就能达到趋利避害的目的。

### 1.1.1 摩擦的类型

摩擦的类型颇多, 依据不同的着眼点, 常见的分类有以下几种。

#### 1.1.1.1 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弹性位移, 但尚未发生相对运动时的摩擦称为静摩擦。在相对运动即将开始瞬间的静摩擦为最大静摩擦, 此时的摩擦系数称为静摩擦系数。

##### 2. 动摩擦

当物体在外力作用下沿另一物体表面相对运动时的摩擦称为动摩擦。两物体之间具有相对运动时的摩擦系数称为动摩擦系数。

#### 1.1.1.2 按发生摩擦的物体部位分类

##### 1. 外摩擦

相互接触的物体作相对运动时, 发生在物体界面之间的摩擦称为外摩擦。通常所说的摩擦大都是指外摩擦, 它只与接触表面的相互作用有关, 而与物体内部状态无关。

##### 2. 内摩擦

发生在同一物体的各部分之间的摩擦称为内摩擦。内摩擦一般发生在流体内部, 也可能发生在固体内部, 如石墨、二硫化钼等固体润滑剂内部。在金属的塑性变形过程中也会产生内摩擦, 如塑性金属的切削加工、材料的塑性成形加工等。

#### 1.1.1.3 按摩擦副的运动形式分类

##### 1. 滑动摩擦

两个相互接触的物体在外力作用下沿接触表面相互滑动时存在于接触界面的摩擦称为滑动摩擦。如导轨面间的相对移动, 活塞在汽缸中的往复运动, 滑动轴承中轴颈与轴承表面间的相对滑动, 都是滑动摩擦。

##### 2. 滚动摩擦

两接触物体在力矩的作用下沿接触表面滚动时的摩擦称为滚动摩擦。例如车辆的车轮沿地面的滚动, 滚珠在轴承沟道内的滚动等。滚动摩擦时, 其接触处常常表现为点与点 (如球形滚动轴承) 或线与线 (如圆柱滚子轴承) 的摩擦。

#### 1.1.1.4 按摩擦表面的润滑状态分类

##### 1. 干摩擦

两摩擦表面间没有任何润滑物质 (包括润滑剂、氧化膜、水蒸气等) 存在时的摩擦称为干摩擦。干摩擦将产生大量的摩擦功损耗和严重的磨损, 在运动副中应尽量避免出现干摩擦。

##### 2. 流体摩擦

被具有体积特性的连续流体层隔开的两固体相对运动时的摩擦称为流体摩擦。流体摩擦

发生在流体润滑膜的分子之间时，摩擦力的大小仅与流体的粘度、滑动速度和接触面积有关，而与摩擦面的材料和表面状态无关。在这种摩擦状态下，摩擦因数最小，消耗功率小，是一种理想的摩擦状态。

### 3. 边界摩擦

边界摩擦是由流体摩擦过渡到干摩擦之前的临界状态。在这种状态下，摩擦表面仅由吸附在表面上的一层极薄的润滑膜（在  $0.1 \sim 1\mu\text{m}$  之间）隔开，该润滑膜不遵从流体动力学定律，摩擦力的大小与润滑膜的粘度无关，只与两表面的特性和润滑膜分子对摩擦表面的吸附特性有关。边界摩擦的摩擦系数介于流体摩擦系数和干摩擦系数之间。

### 4. 混合摩擦

在摩擦副中既有干摩擦又有边界摩擦，或者既有边界摩擦又有流体摩擦，或者三者同时存在，这种摩擦状态称为混合摩擦。混合摩擦一般以半干摩擦或半流体摩擦的形式出现。所谓半干摩擦，是指在摩擦表面上同时存在着干摩擦和边界摩擦的状况。所谓半流体摩擦，则是指在摩擦表面上同时存在着边界摩擦和流体摩擦的状况。混合摩擦是机器在实际运转过程中最常见的一种摩擦形式。

在切削加工中，刀具与工件表面、刀具与切屑底层之间通常存在着的摩擦形式为滑动摩擦。根据切削条件的不同，它可能是外摩擦，也可能是内摩擦；其摩擦表面的润滑状态可能是无润滑（干摩擦），或边界润滑，或混合润滑。

## 1.1.2 古典摩擦定律（阿蒙顿-库仑定律）

古典摩擦定律主要由达·芬奇（L. Da Vinci）、阿蒙顿（G. Amontons）和库伦（G. Coulomb）在 16~18 世纪期间相继完成。其主要结论是（见图 1-1）：

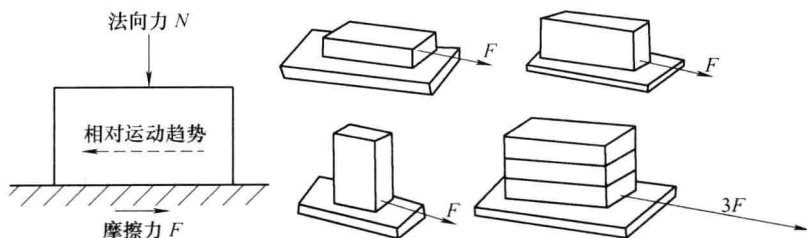


图 1-1 阿蒙顿-库仑定律示意图

- 1) 摩擦力与接触面之间的法向载荷成正比。
- 2) 摩擦力与名义接触面积无关。
- 3) 摩擦力与滑动表面的性质无关。
- 4) 摩擦力与滑动速度无关。

显然，结论 1) 可表述为

$$F = \mu N \text{ 或 } \mu = F/N \quad (1-1)$$

式中  $F$ ——两固体接触面之间的摩擦力；

$\mu$ ——两固体接触面之间的摩擦系数；

$N$ ——两固体接触面之间的法向载荷。

结论 1) 基本上是正确的，并由此可以定义摩擦系数；但是，在高接触应力条件下并不

适用, 因为此时实际接触面积接近于名义接触面积; 此外, 对某些很硬的材料 (如金刚石) 或极软的材料 (如特氟隆等) 亦不尽相符, 此时, 其摩擦力和法向载荷之间表现出非线性关系。其他 3 个结论也都有一定的适用条件。结论 2) 不适用于弹性材料及粘弹性材料; 此外, 当表面十分光滑和洁净时, 摩擦力与实际接触面积成正比。结论 3) 不适用于粘弹性材料; 严格说来, 结论 4) 对任何材料都不适用; 当然对金属材料而言, 不像对粘弹性显著的弹性体那样更不符合规律。近期的研究表明, 静摩擦系数实际上是接触时间的函数, 但它只在静止接触的初期 ( $t = 0 \sim 10\text{s}$ ) 变化较大, 而接触较长时间后变化趋缓 (见图 1-2<sup>[1]</sup>); 而动摩擦系数在整个速度范围内都是速度的函数 (见图 1-3<sup>[1]</sup>), 只有当滑动速度在有限的范围内变化时, 可把摩擦系数取为常数而视为与滑动速度无关。

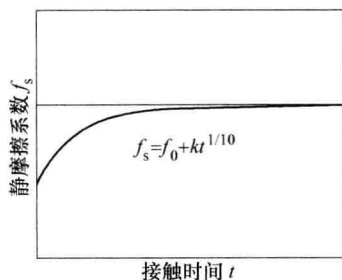


图 1-2 静摩擦系数与接触时间的关系

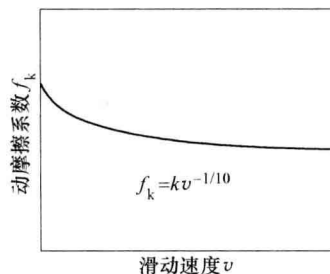


图 1-3 动摩擦系数与滑动速度的关系

古典摩擦定律是早期的科学家根据简单的实验手段得出的结论。其特点是: 不考虑接触情况, 未涉及材料性质, 摩擦系数  $\mu$  的物理意义不明确。因此, 古典摩擦定律是一种较粗略的理论。实践证明, 它基本上适合于一般工程实际。虽然这些定律还存在一定的局限性, 但对指导几个世纪以来的工程实践和科学研究功不可没。

### 1.1.3 各种摩擦理论简介

从 16 世纪达·芬奇研究摩擦理论开始, 经过许多科学家的努力, 由观察宏观表面到微观表面, 从定性分析到定量计算, 从静态研究到动态研究, 由单因素探讨到多因素综合研究, 对摩擦现象及其机理的认识逐步深化。由于摩擦现象受诸多因素的影响, 在长期的研究过程中, 对滑动摩擦从不同角度提出了各种阐明摩擦机理及规律的理论, 可归纳为机械啮合理论、分子作用理论和分子-机械作用理论三类。但由于摩擦问题本身的复杂性, 至今尚未形成统一的理论体系。下面仅对各种摩擦理论作扼要介绍。

#### 1.1.3.1 机械啮合理论

机械啮合理论认为, 摩擦起因于两个粗糙接触表面的凹凸体间的机械啮合作用, 从而产生了阻碍两固体作相对运动的阻力。按照该理论, 可用与水平面成  $\theta$  角的斜面上的摩擦作为粗糙度的模型。摩擦是沿粗糙表面上升的结果。摩擦系数等于粗糙表面倾斜角  $\theta$  的正切, 即

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

式中  $F$ ——摩擦力 (N);

$N$ ——法向载荷 (N);

$\mu$ ——摩擦系数。

这正是古典摩擦第一定律。当倾斜角  $\theta = 6^\circ \sim 20^\circ$  时, 得到实际表面粗糙度的摩擦系数  $\mu$

$=0.1 \sim 0.5$ ，其平均值为  $0.3$ 。

机械啮合理论认为，当硬的粗糙表面在软的表面滑过时，硬的微凸体压入并“耕犁”软的表面，软表面的材料被挤向旁边形成犁沟。硬的微凸体在软的表面滑过时克服材料变形所受的阻力就是摩擦力。

实践表明，机械啮合理论只适用于粗糙表面。减小固体接触表面的粗糙度值可以降低摩擦系数。但对很光滑的表面（如超精密加工过的表面），微凸体之间的机械作用减小，而接触表面之间的分子作用力增大，摩擦系数反而增大，机械啮合理论就不适用了。

### 1.1.3.2 分子作用理论

1734年，英国的德萨古利埃（J. T. Desaguliers）首先提出由接触点处分子吸引力引起摩擦力的分子学说。他将一个铅球切下的一部分和另一个铅球切下的部分加压并轻微转捻，这两部分就会粘合在一起，要用很大的力才能将它们拆开。而且他还观察到它们之间的实际接触面积只有名义接触面积的几分之一。

1929年，汤姆林森（G. A. Tomlinson）提出分子之间的吸力和斥力是分子间距离的函数。当两个粗糙表面相对滑动时，在微凸体的接触点上分子间的距离很小，可以产生分子间的斥力，而在另一些接触点的分子之间的距离较大，产生分子间的吸力，由力的平衡条件可知，外法向压力加上所有分子间的吸力应等于所有分子间的斥力之和。根据上述观点，他推导出摩擦系数与接触面积成正比、与载荷的立方根成反比。

前苏联的捷里亚金（Е. В. Дерягин）利用分子理论得出计算摩擦力的公式为

$$F = \mu(N + A_r P_m) \quad (1-3)$$

式中  $F$ ——摩擦力；

$N$ ——法向载荷；

$A_r$ ——实际接触面积；

$P_m$ ——作用在单位实际接触面积上的分子力。

分子作用理论明确指出了分子作用对摩擦力的影响，但对一些摩擦现象却很难解释。例如，根据分子作用理论应得出这样的结论：表面越粗糙实际接触面积越小，因而摩擦系数应越小。显然，这种分析是不符合实际情况的。

### 1.1.3.3 分子-机械作用理论

20世纪30年代末是固体摩擦理论研究的兴旺时期。人们从分子作用和机械作用联合的观点出发，较完整地发展了固体摩擦理论。事实上，在前苏联和英国同时建立了两个学派，他们都进行了关于两个固体在摩擦时相互接触作用机理的创造性研究。

1939年，前苏联的克拉盖尔斯基（И. В. Крагелвский）发表了一系列论文。他认为，滑动摩擦是由克服对偶表面间分子相互作用的连接力和使表面层产生变形的机械阻力（变形阻力）所决定的。因而，摩擦力是由机械分力和分子分力两部分组成，即总摩擦力

$$F = \tau_0 S_0 + \tau_m S_m \quad (1-4)$$

式中  $\tau_0$ ——单位面积上分子作用产生的摩擦力；

$S_0$ ——分子作用面积；

$\tau_m$ ——单位面积上机械作用产生的摩擦力；

$S_m$ ——机械作用面积。

经过进一步推导得出

$$F = \alpha A_r + \beta W = \beta [(\alpha/\beta) A_r + W] \quad (1-5)$$

式中  $\alpha$ 、 $\beta$ ——由摩擦表面的物理性质和机械性质决定的系数， $\alpha/\beta$  代表单位面积的分子力转化成的法应力；

$A_r$ ——实际接触面积， $A_r = S_0 + S_m$ ；

$W$ ——作用在接触面上的法向载荷。

式 (1-5) 称为摩擦二项式定律。

#### 1.1.3.4 粘着摩擦理论

1938 年，英国的鲍登 (F. P. Bowden) 和他的学生首先在滑动条件下测量了真实接触面积，提出了在两摩擦面间产生焊合结点的论点，建立了较完善的粘着摩擦理论。

##### 1. 简单粘着摩擦理论

简单粘着摩擦理论的基本观点如下：

1) 固体的接触只发生在接触表面的凸峰上 (见图 1-4<sup>[1]</sup>)，实际接触面积  $A_r$  远小于名义接触面积  $A_s$ 。

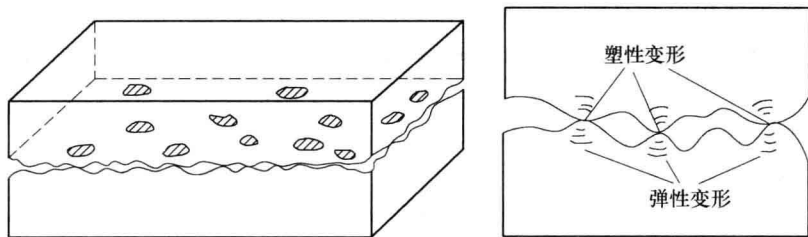


图 1-4 凸峰接触示意图

2) 受载荷时，凸峰发生塑性变形，实际接触面积增加，直至足以平衡法向载荷。此时法向载荷  $N = A_r \sigma_s$ ，实际接触面积  $A_r = N/\sigma_s$  ( $\sigma_s$  为较软一方材料的屈服极限)。

3) 当载荷足够大时，接触点由塑性变形发展为粘着 (冷焊)。欲使两物体沿接触面相互滑动，必须克服两种力：

① 使粘结点分开所需的剪切力  $F_s = A_r \tau_b$  ( $\tau_b$  为较软一方材料的抗剪强度)。

② 硬凸峰刻划 (耕犁) 软凸峰所需的塑性变形力  $F_p$ 。即摩擦力

$$F = F_s + F_p = A_r \tau_b + F_p \quad (1-6)$$

实验证明， $\tau_b$  的数值与滑动速度及摩擦表面的状态有关。对于干净的金属界面，不同材料间的平均粘结力一般大于较弱一方材料 (下称软材料) 内部的结合力。这时，粘结点的剪切通常发生在软材料内部。

$F_p$  的数值取决于软材料的性质，通常与软材料的抗剪强度成正比，而硬凸峰嵌入深度随软材料抗剪强度的增加而减小。对于金属摩擦副，在表面不太粗糙的干摩擦状态下，通常  $F_p$  的数值远小于  $F_s$  值，粘着效应是产生摩擦力的主要原因，可忽略犁沟效应。于是，式 (1-6) 变为

$$F = A_r \tau_b = N \tau_b / \sigma_s = \mu N \quad (1-7)$$

则摩擦系数

$$\mu = \frac{\tau_b}{\sigma_s} = \frac{\text{软材料的抗剪强度}}{\text{软材料的屈服极限}} \quad (1-8)$$

这就是简单粘着摩擦理论。简单粘着摩擦理论的结论为：

- 1) 摩擦力与法向载荷成正比。
- 2) 摩擦系数与名义接触面积无关。
- 3) 摩擦系数与软材料的抗剪强度成正比，而与其压缩屈服极限成反比。

前两点与古典摩擦定律的结论一致，第(3)点涉及了材料的物理性质，是其进步之处。

根据式(1-8)得出的摩擦系数与实测结果不符。例如，对金属材料， $\sigma_s \approx (2 \sim 5) \tau_b$ ，故按式(1-8)计算的摩擦系数 $\mu = 0.2 \sim 0.5$ 。事实上，许多金属摩擦副在较洁净的实测条件下测得的干摩擦系数在1~2之间，在高真空环境下测得的洁净表面间的干摩擦系数甚至大于10。出现分歧的主要原因在于没有考虑使摩擦面产生滑动的切向力对接触面积的影响。为此，鲍登与泰伯(D. Tabor)对这个简单粘着理论作了进一步的修正。

## 2. 修正的粘着摩擦理论

在简单的粘着摩擦理论中，分析实际接触面积时只考虑了屈服极限 $\sigma_s$ ，而计算摩擦力时又只考虑了抗剪强度 $\tau_b$ ，这对于静摩擦可能是合理的。但对于滑动摩擦，由于存在着切向力，接触点发生屈服是由法向载荷与剪切力联合作用的结果。根据平面应力的强度理论，当量应力的形式可写为

$$K^2 = \sigma^2 + \alpha \tau^2 \quad (1-9)$$

因为 $\sigma = N/A_r$ ， $\tau = F/A_r$ ，所以式(1-9)可写为

$$K^2 = (N/A_r)^2 + \alpha (F/A_r)^2 \quad (1-10)$$

式中  $K$ ——当量应力；

$\alpha$ ——待定系数，可用下述的极限条件(1)和(2)求得。

- 1) 当 $F=0$  ( $\tau=0$ ) 时，即静摩擦状态，产生塑性变形的条件是 $\sigma = \sigma_s$ 。

$$\text{故} \quad K = (N/A_r) = \sigma = \sigma_s \quad (1-11)$$

将式(1-11)代入式(1-10)移项后可得

$$A_r^2 = (N/\sigma_s)^2 + \alpha (F/\sigma_s)^2 \quad (1-12)$$

- 2) 当 $F$ 足够大、 $N$ 相对很小时， $N/A_r$ 可略去不计。在这种情况下， $\tau$ 必然接近于抗剪强度，即 $\tau = F/A_r = \tau_b$ 。根据式(1-10)有

$$K^2 \approx \alpha (F/A_r)^2 = \alpha \tau^2 = \alpha \tau_b^2$$

$$\text{故} \quad \alpha \approx K^2/\tau_b^2 = (\sigma_s/\tau_b)^2 \quad (1-13)$$

实验结果表明，多数金属材料的 $\sigma_s/\tau_b$ 之值在2~5之间，故 $\alpha$ 在4~25之间。

式(1-12)中， $(N/\sigma_s)^2$ 是法向载荷 $N$ 对实际接触面积 $A_r$ 的贡献，而 $\alpha(F/\sigma_s)^2$ 则是摩擦力 $F$ 对实际接触面积 $A_r$ 的贡献，即由于摩擦力的作用，使粘结点的面积增大，此即所谓粘结点的增长。要把增大的粘着面积剪断，就需要更大的剪切力。由此可知，纯净表面摩擦时，实际接触面积可能会增加很多，因而使摩擦系数变大，这也可以解释在真空中所测得的摩擦系数为什么会很大。

实际上，固体表面一般都存在一层表面膜(氧化膜、润滑膜等)，其强度低于基体材料。有表面膜的摩擦属于硬凸峰刻划(耕犁)表面膜的情形。设基体材料的抗剪强度为 $\tau_b$ ，表面膜的抗剪强度为 $\tau'_b$ ，且有 $\tau'_b = C\tau_b$ ，其中 $C$ 为系数( $0 < C < 1$ )。在法向载荷与剪切力联合作用下，当切应力 $\tau = F/A_r < \tau'_b$ 时，粘着点增长，接触面积增大；当切应力增大至 $\tau =$

$\tau'_b$ 时, 表面膜被剪断, 粘着点增长终止, 摩擦副产生滑动。由式 (1-9) 和式 (1-11) 可得出摩擦副开始滑动的条件为

$$\sigma_s^2 = \sigma^2 + \alpha \tau_b'^2 \quad (1-14)$$

根据式 (1-13), 有  $\alpha \approx (\sigma_s/\tau_b)^2$ , 代入式 (1-4) 整理后得

$$\sigma^2 = \sigma_s^2 - \alpha \tau_b'^2 = \alpha (\tau_b^2 - \tau_b'^2) = \alpha \tau_b^2 (1 - C^2)$$

故

$$\sigma = \tau_b \sqrt{\alpha(1 - C^2)} \quad (1-15)$$

由此可求得摩擦系数

$$\mu = \frac{\tau_b'}{\sigma} = \frac{C}{\sqrt{\alpha(1 - C^2)}} \quad (1-16)$$

图 1-5 所示为根据式 (1-16) 绘制的  $\mu$ - $C$  关系曲线<sup>[2]</sup>。当  $C \rightarrow 1$  时,  $\mu \rightarrow \infty$ ; 这说明两摩擦表面抗剪强度越接近则摩擦系数越大 (如不存在氧化膜、润滑膜时同种材料的洁净表面)。当  $C$  从 1 减小时,  $\mu$  值迅速降低, 这说明软材料或软的表面膜可以大大降低摩擦系数。

当  $C$  值很小时,  $(1 - C^2)$  趋近于 1, 式 (1-16) 可近似写成

$$\mu \approx \frac{C}{\sqrt{\alpha}} = \frac{\tau_b'/\tau_b}{\sigma_s/\tau_b} = \frac{\tau_b'}{\sigma_s} = \frac{\text{表面膜的抗剪强度}}{\text{基体材料的屈服极限}} \quad (1-17)$$

式 (1-17) 就是修正的粘着摩擦理论。它仍然是根据简单粘着摩擦理论的模型而来并包含着一些假设, 但更切合实际, 可以在相当大的范围内解释摩擦现象。修正的粘着摩擦理论在原有基础上进一步补充说明了以下两点:

1) 在通常情况下, 摩擦表面存在着一层表面膜, 其抗剪强度可在极低值到基体金属抗剪强度之间变化; 表面膜被剪断所需要的力是摩擦力的主要成分。

2) 接触点发生屈服是由法向载荷与剪切力联合作用的结果, 真实接触面积不仅取决于正压力, 也与摩擦力的作用有很大关系。

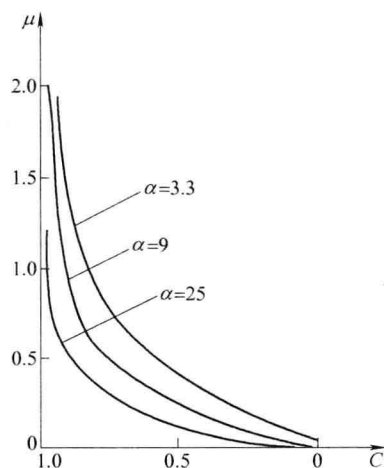


图 1-5  $\mu$ - $C$  关系

## 1.2 磨损

磨损是相互接触物体在作相对运动时, 表层材料不断发生损耗、转移或者产生残余变形的过程。它是摩擦的必然结果。尽管有些磨损现象是有益的, 如 (主动的) “研磨”, 可使零件表面粗糙度值减小, 使切削刃变得锋利。但是, 据统计, 有 80% 左右的机械零件是由于 (被动的) 磨损而报废或失效。磨损不仅消耗材料, 浪费能源, 并直接影响到机器的寿命和可靠性。因此, 对磨损的研究引起了人们的极大关注。

20 世纪 50 年代初期, 工业发达国家开始研究 “粘着磨损理论”。1953 年, 阿查得 (Achard) 提出简单的磨损计算公式, 1957 年, 克拉盖尔斯基 (Крагельский) 提出固体疲

劳理论和计算方法,1973年,苏(Suh)提出磨损剥层理论。60年代以后,由于电子显微镜、光谱、能谱、俄歇谱、X射线衍射等测试方法及放射性同位素示踪技术的利用,促使磨损研究在磨损力学、机理、失效分析、监控和维修等方面有了较快的发展。目前已能直接在电子显微镜中进行磨损试验,便于观察和电视录像,从而了解磨损的动态过程以及研究磨损表面和磨屑的形貌、成分和组织,使人们可更深入地研究磨损的机理<sup>[3]</sup>。

### 1.2.1 磨损的定义与分类

磨损是指固体与其他物体(或介质)相互间发生机械摩擦作用时其表层被破坏的过程。磨损是一个多因素互相影响的复杂过程,包括环境因素(如湿度、温度及周围空气成分等)、润滑条件、工作条件(如载荷、速度及运动方式等)以及零件材料的成分、组织及工作表面的物理化学性质等。其中每个因素稍有变化都会引起磨损量的改变并使磨损机理发生变化。

至今尚未建立统一的磨损分类方法。根据不同的条件,磨损有不同的分类方法。例如,按磨损机理可分为磨粒磨损、粘着磨损、疲劳磨损、腐蚀磨损、微动磨损和浸蚀磨损;按摩擦表面的作用可分为机械磨损、分子-机械磨损、腐蚀-机械磨损;按磨损大小可分为轻微磨损、严重磨损;也有按表面变化特征来分类的。

### 1.2.2 磨损过程

图1-6所示为机械零件的典型磨损过程,可大致分为以下三个阶段。

#### 1. 初期磨损阶段

在一定载荷作用下,因为摩擦表面的凹凸和微观平面度影响,接触点少,压强很大,磨损速度开始很快,逐渐随时间的增加而下降,如图1-6中的AB段。这一阶段对接触表面起磨合作用,也可叫做磨合磨损阶段。

#### 2. 稳定磨损阶段

经过初期磨损阶段的磨合作用,摩擦表面的波峰、波谷逐渐被磨去,实际接触面积增大,接触压强减小,摩擦面被加工硬化,磨损过程趋于稳定,磨损量与时间大致成正比增加,如图1-6中的BC段,称为稳定磨损阶段。

#### 3. 急剧磨损阶段

C点以后,由于摩擦副温度升高、接触表层金属组织变化等,使摩擦条件发生较大变化,磨损速度会急剧增加,进入急剧磨损阶段。如果在这一阶段工作,机械精度和效率均会下降,甚至会出现异常的噪声和振动,最后导致零件或机器失效。

由磨损过程可知,为了提高机器零件的使用寿命,应尽量延长其稳定磨损阶段。此外,初期磨损阶段的磨合过程颇为重要。实践证明,良好的磨合能够使摩擦副的寿命提高1~2倍,并能有效地改善摩擦副的其他性能。例如,滑动轴承经过正确的磨合可改善表面形貌,有利于建立流体动压油膜;发动机经过合理的磨合能提高汽缸活塞环的表面品质,减少擦伤痕迹,提高密合性,从而使发动机耗油量降低。

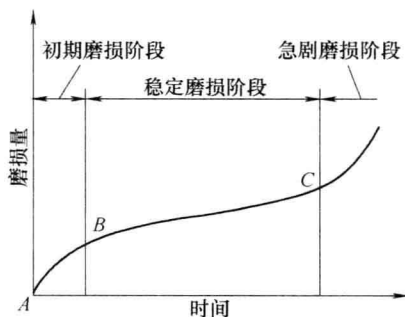


图1-6 典型磨损过程

## 1.3 润滑

### 1.3.1 润滑的含义与作用

#### 1.3.1.1 润滑的含义

润滑就是在相互运动的摩擦副中加入某种物质，以控制表面之间的摩擦并降低其磨损的措施。加入到相互运动表面之间控制其摩擦或磨损的物质称为润滑剂，包括油状、脂状、粉状、薄膜状（粘结膜、镀膜、固体润滑膜、陶瓷膜等）和整体状（如金属基、非金属基自润滑材料）的各种润滑材料。所谓控制摩擦，指根据需要调整摩擦状态，大多数情况是为了减小摩擦，但也有调节和利用摩擦的情形。例如，在湿式离合器和机床导轨上使用润滑剂的主要目的是控制静、动摩擦系数，使其尽量接近，达到静、动摩擦平滑过渡，消除粘-滑（爬行）现象以及颤震和噪声。在牵引传动中，采用牵引油增大摩擦以提高传递功率等。

#### 1.3.1.2 润滑的作用

摩擦副中的润滑剂可减少或避免摩擦表面直接接触，从而减少其磨损。此外，润滑剂还具有防止表面腐蚀、降低表面温度、冲洗磨屑或污物、密封和减振等功能。

### 1.3.2 润滑的分类

#### 1.3.2.1 按润滑剂的物质形态分类

##### 1. 气体润滑

使用空气、蒸汽或氮气等某些惰性气体作为润滑剂，可使摩擦表面被高压气体隔开。如航海用的惯性陀螺仪，重型机械中垂直透平机的推力轴承，高速磨头的轴承等，都采用气体润滑。气体润滑的最大优点是摩擦系数极小，几乎接近于零。气体的粘度不受温度的影响，所以气体润滑的轴承阻力小、精度高。

##### 2. 液体润滑

用液体润滑剂进行润滑。液体润滑剂包括矿物油、动植物油、合成油，还包括乳化液、合成液、水等（例如用水作初轧机胶木轴瓦的润滑冷却剂）。

##### 3. 半固体润滑

使用润滑脂或膏作润滑剂。润滑脂或膏是介于流体和固体之间的一种半固体（或称半流体）物质，包括经过稠化的矿物油和合成油、皂类、脂肪类、石蜡等。脂膏类润滑剂不易流失，有较好的密封作用和抗锈蚀能力。

##### 4. 固体润滑

利用具有润滑性能的固体物质作润滑剂，包括层状固体、软金属以及高分子聚合物等。常用石墨、二硫化钼、二硫化钨、滑石粉等代替润滑油脂隔离摩擦接触表面，形成固体润滑膜，以起到减少摩擦、降低磨损的作用。

#### 1.3.2.2 按润滑膜在摩擦表面间的分布状态分类

##### 1. 全膜润滑

摩擦面之间有润滑剂，并能生成一层完整的润滑膜，把摩擦表面完全隔开。摩擦表面相对运动时，摩擦发生在润滑膜的内部分子之间，这种状态称为全膜润滑，是一种理想的润滑

状态。全膜润滑有多种形态,液体润滑就是其中之一。它是用液体作为润滑剂而获得的一种理想润滑状态。此外,还可以用气体、固体、半固体状态的润滑剂形成两层完整的润滑膜。在边界摩擦状态下,只要润滑剂选用得当,在一定条件下也能获得一层完整的边界润滑膜,能够起到控制摩擦、减少磨损的作用。

## 2. 非全膜润滑

由于摩擦表面粗糙不平,或因载荷过大、速度变化等因素的影响,使润滑膜遭到破坏,某些部分有润滑膜,某些部分为干摩擦,这种状态称为非全膜润滑。一般由于运动速度变化(起动、制动、反转),载荷性质变化(突加、冲击、局部集中、变载荷等)以及润滑不良时,经常出现这种润滑状态,此时摩擦表面磨损较快。

### 1.3.2.3 按润滑原理分类

#### 1. 流体静力润滑

流体静力润滑是利用外部供液装置将具有一定压力的液体润滑剂输送到摩擦副中,将摩擦表面隔开并支持外载荷的润滑方式。图 1-7 所示为液体静力润滑原理示意图<sup>[4]</sup>。在平板 1 上作用有载荷  $F_n$ ,在支承板 2 上开有一定深度的油腔,外部供油系统将具有一定压力的润滑油送入油腔。当油压相当大时,足以将平板 1 托起,使两板间出现一定大小的节流间隙。此时平板 1 和平板 2 间无直接接触,处于全膜润滑状态。但是,油必将从节流间隙外泄,所以,除保证足够供油压力外,还必须以一定流量连续供油。流体静力润滑与两摩擦表面的滑动速度无关,因而在起动、制动及任意工作速度时都可保证全膜润滑。其缺点是需要设置专用的供油系统。

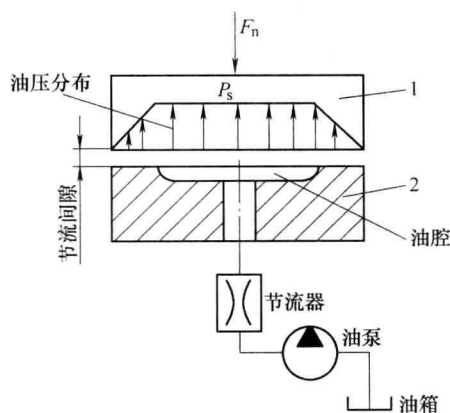


图 1-7 流体静力润滑原理示意图

#### 2. 流体动力润滑

流体动力润滑是依靠摩擦表面间的相对运动和两表面形成的特定几何间隙产生流体压力,使摩擦表面隔开并平衡外载荷的润滑方式。流体动压的形成如图 1-8 所示<sup>[4]</sup>。相互倾斜的板 A 和板 B 形成的大、小口间隙分别为  $h_1$ 、 $h_2$ ,中间充满粘度为  $\eta$  的润滑油。B 板上有载荷  $F_n$ 。B 板相对于 A 板沿  $x$  方向以速度  $v$  滑动。此时,吸附在 B 板上油层速度为  $v$ ,吸附在 A 板上的油层速度为零,中间油层速度变化为直线递减(见图 1-8b)。油被 B 板从大口带入、小口带出,由于  $h_1 > h_2$ ,所以流进的油多,流出的油少,两板间的油会产生一定的油压,有把 B 板托起的趋势;而 B 板上的载荷又

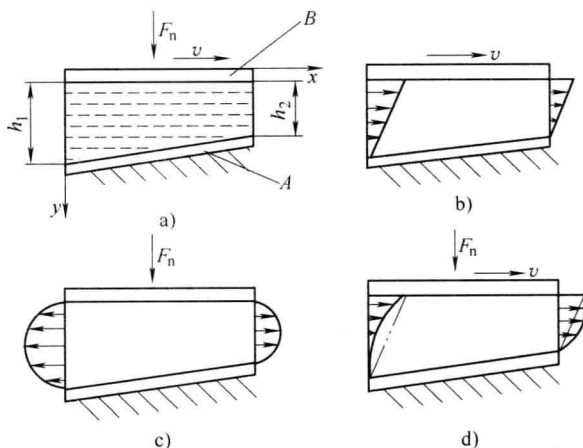


图 1-8 流体动力润滑原理示意图