

新型润滑材料与 润滑技术 实用手册

顾志光 主编

国防工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

新型润滑材料与润滑技术实用手册/颜志光主编. —北京:国防工业出版社, 1999. 2

ISBN 7-118-01925-9

I. 新… II. 颜… III. ①机械-润滑剂-手册②机械-润滑-技术手册 IV. TH117. 2-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 12825 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

河北三河市腾飞胶印厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 65¼ 1528 千字

1999 年 2 月第 1 版 1999 年 2 月北京第 1 次印刷

印数: 1—3000 册 定价: 99.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

内 容 简 介

近几十年来,随着机械工业技术的飞速发展,新型润滑材料大量涌现,润滑密封技术不断更新。大量实践证明:推广应用新型润滑材料和润滑密封新技术,可保证机械设备在更苛刻的使用条件下长期正常运转,发挥最大功能,减少维修及停工损耗,节约能源和材料,提高综合经济效益。本手册详细介绍了各种新型润滑材料(包括矿物油、合成油、润滑脂和固体润滑剂)的制备方法、性能特点、规格标准、测试方法及应用实例,同时还介绍了各种润滑密封新技术及废油回收的再生技术,汇集了较丰富的实用数据。

本书可供机械设计、维修、使用及润滑剂研究、生产和教学人员参考使用。

前 言

摩擦学在中国的发展已有近 20 年的历史。润滑和润滑材料是摩擦学的一个重要组成部分。随着摩擦学的发展,特别是摩擦化学的发展,性能优越的新型润滑材料不断涌现。国内外无数经验证明,应用现有的摩擦学知识于生产中,特别是应用新型润滑材料和润滑密封新技术,可使机械设备在更苛刻的使用条件(如高温、高速、重负荷、特殊介质环境)下持久稳定工作,发挥最大功能,减少维修及停工损耗,节约能耗和材料消耗,提高综合经济效益。

为了大力宣传和推广应用新型润滑材料和润滑密封新技术,我们约请几位多年从事各种润滑材料和润滑密封技术研究的专家编写这部手册,全面收集和整理有关近几年发展和应用的国内外新型润滑材料和润滑密封技术的性能数据、规格标准、测试方法和应用实例,技术力求新颖和实用,数据力求完备和准确,便于读者根据具体实际情况来采用,以加速我国工业设备润滑技术的更新和发展,达到节能和经济节约的目的。

本手册共分十章,第一章介绍摩擦学的基本理论;第二章介绍润滑材料的基本功能、分类和常用分析测试技术;第三章和第四章介绍矿物润滑油和添加剂的组成、性能特点、规格标准和应用技术;第五章介绍合成润滑油的结构和性能特点、规格标准及其应用技术;第六章介绍各种润滑脂的分类、组成和结构特点、规格标准和应用技术;第七章介绍固体润滑的基本概念、固体润滑剂的分类、组成、性能特点和应用技术;第八章介绍金属加工中的润滑技术;第九章介绍密封新技术;第十章介绍废油再生新技术。

参加本手册编写工作的有颜志光(主编及第二、五章)、党鸿辛(第一、七章)、闫邱提均(第三、四、十章)、汪德涛(第八、九章)、聂明德(第七章)、李辉(第六章)、陈建敏(第一章)。

本书的专业跨度较大,多亏各位作者鼎力协作和精心撰写,并承周润芬等同志反复细心审校,对此谨致衷心的感谢。由于本人专业水平所限,书中疏漏和错误在所难免,恳请读者批评指正。

颜志光 1997 年 8 月

目 录

第一章 摩擦、磨损、润滑的基本知识	(1)
第一节 摩擦	(1)
一、摩擦的分类	(1)
二、摩擦的理论	(3)
三、摩擦的作用	(11)
第二节 磨损	(21)
一、磨损的定义和磨损过程	(21)
二、磨损的分类	(22)
三、磨损机理与理论	(25)
第三节 润滑	(45)
一、润滑的定义	(45)
二、润滑的分类	(46)
三、润滑机理与理论	(47)
四、润滑方式	(55)
参考文献	(56)
第二章 润滑剂总论	(58)
第一节 润滑剂的基本功能	(58)
第二节 对润滑剂的基本性能要求	(58)
第三节 润滑剂的分类和选择	(59)
一、液体润滑剂	(59)
二、半固体润滑剂	(60)
三、固体润滑剂	(61)
四、气体润滑剂	(61)
第四节 润滑油脂的质量指标和相应测试方法	(63)
一、润滑油的质量指标及其测试方法	(63)
二、润滑脂的质量指标及其测试方法	(99)
第五节 润滑剂的管理和贮存	(123)
参考文献	(126)
第三章 矿物润滑油和添加剂	(127)
第一节 矿物润滑油的组成和结构特点	(127)

一、矿物润滑油的基本组成	(127)
二、润滑油组成和主要性质的关系	(131)
三、润滑油组成的表示方法	(133)
第二节 矿物润滑油的基本生产方法	(134)
第三节 矿物润滑油基础油标准	(138)
第四节 润滑油添加剂	(147)
一、清净分散剂	(150)
二、抗氧化剂和抗氧化抗腐剂	(154)
三、降凝剂	(157)
四、粘度指数改进剂	(159)
五、油性剂和极压抗磨剂	(161)
六、防锈剂	(166)
七、抗泡剂	(169)
八、抗乳化剂	(169)
参考文献	(170)
第四章 矿物润滑油的应用	(172)
第一节 内燃机油	(172)
一、使用条件与油的作用	(172)
二、内燃机油的主要性能	(173)
三、汽油机油和柴油机油的分类、品种和标准	(175)
四、汽油机油和柴油机油的选用	(203)
五、二冲程汽油机油	(209)
第二节 齿轮油	(214)
一、齿轮油的使用条件	(214)
二、齿轮油的性质	(215)
三、车辆齿轮油	(216)
四、工业齿轮油	(223)
第三节 液压油(液)	(235)
一、液压传动及其对油的要求	(235)
二、液压油的主要性质	(236)
三、液压油的分类	(240)
四、液压油的品种规格	(242)
五、液压油的选用和更换	(250)
六、液力传动油	(253)
第四节 压缩机油(包括冷冻机油和真空泵油)	(262)
一、压缩机的润滑及使用要求	(265)
二、压缩机油的基本质量要求	(266)
三、压缩机油的品种和规格	(269)

四、压缩机油的选用和换油指标	(273)
五、冷冻机油的品种和质量	(277)
六、真空泵油的品种和质量	(278)
第五节 全损耗系统润滑油	(284)
第六节 主轴油和导轨油	(288)
一、轴承润滑和轴承油的质量指标	(288)
二、主轴油的应用	(292)
三、导轨油	(293)
第七节 防锈油	(298)
一、防锈机理	(298)
二、防锈油脂的分类	(299)
三、防锈油的主要性能指标	(302)
四、防锈油的质量和品种	(303)
第八节 热传导油(液)	(309)
一、热传导油(液)的分类	(309)
二、对热传导油(液)的性能要求	(310)
三、热传导油(液)的品种和质量	(310)
四、热传导油(液)的选择和报废	(313)
第九节 电器绝缘油	(313)
一、对电器绝缘油的性能要求	(313)
二、电器绝缘油的产品标准	(315)
三、变压器油的运行监督	(318)
第十节 汽轮机油	(319)
一、汽轮机油的分类	(319)
二、对汽轮机油的质量要求	(321)
三、汽轮机油的品种和标准	(321)
四、汽轮机油的选用和报废	(325)
参考文献	(326)
第五章 合成润滑油	(327)
第一节 概述	(327)
一、合成润滑油的分类	(327)
二、合成润滑油的原料	(328)
三、合成润滑油的特点	(328)
四、使用合成润滑剂的技术经济意义	(331)
第二节 酯类油	(334)
一、酯类油的化学结构	(334)
二、酯类油的制备	(336)
三、酯类油的性能	(338)

四、酯类油的应用.....	(356)
第三节 聚醚	(386)
一、聚醚的化学结构.....	(386)
二、聚醚的制备.....	(386)
三、聚醚的性能.....	(388)
四、聚醚的应用.....	(400)
第四节 聚α-烯烃	(407)
一、聚 α -烯烃的化学结构.....	(408)
二、聚 α -烯烃的制备.....	(408)
三、聚 α -烯烃的性能.....	(409)
四、聚 α -烯烃的应用.....	(416)
第五节 硅油和硅酸酯	(419)
一、硅油和硅酸酯的化学结构.....	(419)
二、硅油和硅酸酯的制备.....	(421)
三、硅油和硅酸酯的性能.....	(427)
四、硅油和硅酸酯的应用.....	(452)
第六节 氟油	(468)
一、氟油的化学结构.....	(468)
二、氟油的制备.....	(469)
三、氟油的性能.....	(472)
四、氟油的应用.....	(481)
第七节 磷酸酯	(484)
一、磷酸酯的化学结构.....	(484)
二、磷酸酯的制备.....	(484)
三、磷酸酯的性能.....	(485)
四、磷酸酯的应用.....	(491)
参考文献.....	(503)
第六章 润滑脂	(505)
第一节 润滑脂的特点	(505)
一、什么是润滑脂.....	(505)
二、润滑脂的触变性.....	(505)
三、润滑脂的优点和局限性.....	(506)
第二节 润滑脂的组成及结构特点	(507)
一、基础油.....	(507)
二、稠化剂.....	(513)
三、添加剂和填料.....	(534)
四、润滑脂的结构特点.....	(538)
第三节 润滑脂的基本生产方法	(540)

一、润滑脂的基本制备方法	(540)
二、制备润滑脂的主要设备和基本流程	(541)
三、锂基润滑脂的制备	(549)
四、复合锂基润滑脂的制备	(550)
五、复合钙基润滑脂的制备	(550)
六、复合铝基润滑脂的制备	(551)
七、膨润土润滑脂的制备	(552)
第四节 润滑脂的应用	(554)
一、润滑脂的选择	(554)
二、润滑脂的合适用量	(557)
三、润滑脂在飞机上的应用	(559)
四、润滑脂在汽车上的应用	(587)
五、润滑脂在冶金工业中的应用	(610)
六、润滑脂在石油化工、纺织印染行业的应用	(641)
七、润滑脂在油气田的应用	(660)
八、精密机械用润滑脂	(672)
九、润滑脂在铁路机车车辆上的应用	(686)
十、润滑脂在造纸工业中的应用	(691)
十一、几个特殊高温部位的脂润滑	(694)
十二、润滑脂的质量管理和包装、贮存、使用中应注意的问题	(696)
参考文献	(697)
第七章 固体润滑	(699)
第一节 固体润滑的基本概念	(699)
第二节 固体润滑剂的定义和分类	(701)
一、固体润滑剂的定义及其基本性能	(701)
二、固体润滑剂的分类	(704)
第三节 固体润滑剂的组成和性能特点	(707)
一、石墨及其同素异构体和层间化合物	(707)
二、二硫属化合物	(724)
三、PTFE 及其它塑料	(738)
四、软金属、氧化物、氟化物及其它固体润滑剂	(753)
第四节 固体润滑剂的复合效应	(764)
一、固体粉末润滑	(764)
二、固体润滑膜的润滑	(767)
三、自润滑复合材料	(774)
四、复合材料的应用	(790)
五、金属基复合材料	(795)
第五节 固体润滑剂性能测试方法	(801)

一、各种固体润滑剂的测试项目	(801)
二、几种摩擦磨损测试设备	(806)
第六节 固体润滑剂的选择与应用	(808)
一、固体润滑剂的应用方式	(808)
二、固体润滑剂的应用实例	(813)
参考文献	(828)
第八章 金属加工润滑	(833)
第一节 概述	(833)
第二节 金属切削过程的冷却润滑机理	(833)
一、切屑形成机理	(833)
二、积屑瘤的形成及其对切削过程的影响	(835)
三、切屑的类型	(835)
四、金属切削冷却润滑液的作用	(836)
五、磨削加工过程的冷却润滑特点	(839)
第三节 金属切削冷却润滑剂的分类和组成	(840)
一、油基切削液的分类	(842)
二、油基切削液的组成	(843)
三、水基切削液的分类	(844)
四、水基切削液的组成	(846)
五、膏状及固体润滑剂 (L-MHG、L-MHH 或 L-MAI)	(847)
六、气体冷却剂	(847)
第四节 金属切削润滑冷却液的选择和应用	(847)
一、金属切削润滑冷却液的选择原则	(847)
二、油基切削液与水基切削液在使用上的区别	(849)
三、根据机床的要求选择切削液	(849)
四、根据刀具材料选择切削液	(850)
五、根据工件材料选择切削液	(851)
六、根据加工方法选择切削液	(852)
七、选择切削液的经济分析	(866)
八、切削液切削性能的评定方法	(866)
第五节 金属压力成形加工过程的润滑机理	(867)
一、金属压力成形加工的摩擦学系统	(868)
二、塑性流体动压润滑机理	(868)
三、润滑状态的类型	(871)
四、润滑剂的作用	(872)
第六节 成形加工润滑剂	(872)
一、金属成形加工用油 (液) 的分类和组成	(872)
二、金属成形加工用油 (液) 的选择原则	(882)

三、金属轧制用润滑剂	(884)
四、锻造挤压工艺润滑剂	(890)
五、金属冲压加工用润滑油(液)	(898)
六、拉拔工艺用润滑剂	(902)
七、金属压力铸造用润滑剂	(904)
八、注塑成形润滑脱模剂	(907)
第七节 金属加工润滑剂的质量控制与管理	(909)
一、金属加工润滑剂标准的 ISO 草案	(909)
二、切削液切削性能的评定方法	(912)
三、维护与管理	(913)
第八节 热处理油	(916)
一、热处理油的主要性能	(916)
二、热处理油的分类及其标准	(918)
三、热处理油的选择	(928)
参考文献	(928)
第九章 密封新技术	(930)
第一节 概述	(930)
第二节 密封基本原理	(931)
一、静密封的密封作用	(931)
二、接触式密封的密封作用	(934)
第三节 密封设计	(935)
一、设计及选用的基本要求	(935)
二、密封设计的主要方法	(936)
第四节 密封材料的发展	(937)
一、关于橡胶的改性	(939)
二、工程塑料应用于密封制品	(940)
三、热塑性弹性体的开发及应用	(941)
四、未来的发展	(942)
第五节 橡塑密封技术发展动向	(942)
一、高压化、高速化,适应高温、低温及砂尘等严酷环境	(942)
二、挤压型密封件的技术发展动向	(943)
三、往复动唇形密封的技术发展动向	(944)
四、旋转轴唇形密封技术发展动向	(946)
五、使用计算机辅助进行配方及模具设计、测试及数据处理自动化	(946)
第六节 填料与垫片密封	(947)
一、软填料密封	(947)
二、垫片密封	(947)

第七节 密封胶与密封脂.....	(952)
一、液态密封胶和厌氧胶粘剂.....	(953)
二、密封脂.....	(966)
参考文献.....	(966)
第十章 废油再生	(967)
第一节 废油再生的意义.....	(967)
第二节 废油再生工艺.....	(968)
一、简易再生工艺.....	(969)
二、废油再加工再生工艺.....	(970)
第三节 废油再生中的污水处理.....	(980)
参考文献.....	(981)
附录一 润滑剂及其测定方法国标 (GB) 目录	(982)
附录二 石油和石油产品行业标准目录.....	(986)
附录三 石油和石油产品试验方法行业标准总目录.....	(990)
附录四 世界各主要石油公司产品介绍	(1000)
附录五 从运动粘度查 VI	(1009)
附录六 粘度指数线图	(1010)
附录七 几种润滑油在高压下的密度, 粘度及压粘系数	(1010)
附录八 柴油机油的技术要求 (GB11122—1997)	(1020)
附录九 矿物油型液压油与合成烃型液压油 (GB11118.1—94)	(1024)

第一章 摩擦、磨损、润滑的基本知识

第一节 摩擦

所谓摩擦,按照经济合作与发展组织(OECD)术语集是这样定义的:“在外力作用下,一个物体相对另一个物体运动时或将要运动时,沿着两个物体的界面作用的阻力”^[1];它是日常生活和科学技术领域的任何地方都存在的一种平凡的现象,又是现代许多技术部门经常遇到的最普遍、最重要的问题之一。世界各国的工业技术发展迅速,迫切要求解决有关的摩擦问题,又促使人们对摩擦进行更加深入的研究。尽管过去的研究已经提供了许多有用的概念,但直至现在仍没有广泛承认预测摩擦行为的理论^[2]。主要问题是,摩擦与在界面上发生的许多复杂过程有关。本章谨就摩擦的分类、机理和作用简述于后。

一、摩擦的分类

人们在研究摩擦时往往涉及各种不同的摩擦。为了区分各种摩擦的概念,这里首先对各种不同的摩擦分类予以简要的介绍^[3]。

(一) 按发生摩擦的物体部位分类

1. 外摩擦

这是指在两个相互接触的物体表面之间发生的摩擦。外摩擦即一般所指的摩擦,只与接触表面的作用有关,而与物体内部状态无关。

2. 内摩擦

它是指在同一物体内部各部分之间发生的摩擦。内摩擦一般发生在液体或气体之类的流体内,但也可能发生在固体内,如石墨、二硫化钼等固体润滑剂内。

(二) 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即最大静摩擦,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

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。

静摩擦小于极限静摩擦,而动摩擦则一般小于极限静摩擦。

(三) 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。两接触物体接触点具有不同的速度，可能是速度的大小和方向不同，也可能仅仅是大小或方向不同（见图 1-1 (a)）。

2. 滚动摩擦

两接触物体沿接触表面滚动时的摩擦。此时两接触物体接触点的速度之大小和方向均相同（见图 1-1 (b)）。

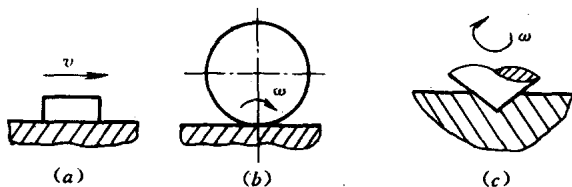


图 1-1 摩擦形式

(a) 滑动摩擦；(b) 滚动摩擦；(c) 自旋摩擦。

3. 自旋摩擦（转动摩擦）

物体沿垂直于接触表面的轴线作自旋运动时的摩擦（见图 1-1 (c)）。在分类时有时不作为单独的摩擦形式出现，以摩擦力矩来表征。

(四) 按摩擦副表面的润滑状态分类

1. 干摩擦

在摩擦学名词术语中是这样定义的：常用于表示名义上无润滑的摩擦。还有两个注释：①无润滑摩擦不等于干摩擦，只有既无润滑又无湿气的摩擦，才能称为干摩擦；②名义上无润滑，但不是绝对干燥的摩擦应称为无润滑摩擦。事实上，所谓干摩擦的测量，通常就是指在大气中测量用酒精、丙酮、苯之类的溶剂洗净或用电解洗净后的表面，测量时无液体润滑剂则是肯定的。所以，对于干摩擦定义为：“常用于表示名义上无液体润滑的摩擦”是比较恰当的。

2. 边界摩擦

相对运动两表面被极薄的润滑膜隔开，而润滑膜不遵从流体动力学定律，且两表面之间的摩擦磨损不是取决于润滑剂的粘度，而是取决于两表面的特性和润滑剂的性能。边界润滑膜的厚度，研究者们提供的数据各不相同，例如有的为 $0.1\mu\text{m}$ ，有的则为 $0.9\sim 1.0\mu\text{m}$ 。

3. 混合摩擦

这是指在摩擦表面上同时存在着流体摩擦、边界摩擦和干摩擦的混合状态下的摩擦。混合摩擦一般以半干摩擦或半流体摩擦的形式出现。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。

4. 流体摩擦

在两物体的摩擦表面被一层连续的流体润滑剂薄膜完全隔开时的摩擦称为流体摩擦。这时摩擦发生在界面间的流体润滑剂膜内，摩擦阻力由流体粘性阻力或流变阻力所决定。

二、摩擦的理论

(一) 摩擦理论概述

在长期研究干摩擦的过程中,由于摩擦现象是受诸多因素影响的,因而从不同的角度提出了不同的理论。对于滑动摩擦可归纳为机械啮合理论、分子作用理论和分子-机械摩擦理论三类。对于滚动摩擦机理也进行了一些研究^[4]。

1. 机械啮合理论

1508年利奥纳多·达·芬奇(Leonardo da Vinci)得出了两条基本的摩擦定律:①摩擦力与载荷成正比;②接触面积对摩擦没有影响。这比牛顿对力所下的清晰定义要早二百年。达·芬奇还得出定量结果,即“任何摩擦物体的摩擦阻力都等于该物体重量的四分之一”,按现代用语即摩擦系数为0.25。

1699年阿芒汤(Amonton)发表了论文,重申了达·芬奇的两条摩擦定律:①摩擦力与法向载荷成正比;②摩擦力与物体大小无关。所谓的阿芒汤定律就是这两条。阿芒汤认识到他所研究的表面都不是光滑的,而且认为,摩擦是由于一个表面沿着另一个表面的微凸体上升做功,或者是由于微凸体发生弯折;或者是由于微凸体发生断裂而引起的。并提出了最简明的摩擦模型,如图1-2所示。摩擦力为

$$F = \sum \Delta F = \tan \varphi \sum \Delta W$$

$$F = \mu W$$

摩擦系数 $\mu = \tan \varphi$, 是由表面状况确定的常数。

库仑(Coulomb)通过实验于1785年又提出了滑动摩擦定律,其具体条文如下:

(1) 摩擦力与作用于摩擦面的垂直力成正比,与外表的接触面积大小无关;

(2) 摩擦力(动摩擦)与滑动速度的大小无关;

(3) 静摩擦力大于动摩擦力。

这三条被命名为库仑定律。实际上,如上所述,早在库仑之前约一百年阿芒汤已基本确认了这些定律,所以也有人把这些定律称为阿芒汤-库仑定律。

库仑与阿芒汤一样,都是把摩擦起因看成是由于接触表面上凹凸不平的微凸体之间的啮合。当两个固体表面发生接触时,凹凸互相啮合而产生了阻碍两固体滑动的阻力,这种学说称为摩擦的“凹凸说”,或称机械啮合理论。

在一般条件下,减小表面粗糙度可以降低摩擦系数。但是,实验表明超精加工表面的摩擦系数反而剧增。另外,当表面吸附一层厚度不及表面粗糙峰高度的十分之一的极性分子后,却能大大地减小摩擦力。这些都表明机械啮合作用并非产生摩擦力的唯一因素。

2. 分子作用理论

在机械啮合理论发展的同时,一些学者认识到不能只用这种简单的理论来解释摩擦。早在1734年英国物理学家德萨古利埃(J. T. Desaguliers)在他的著作《实验物理学教程》中提出,铅球压紧时有很强的粘附力,因而认为在摩擦过程中接触表面间的分子间

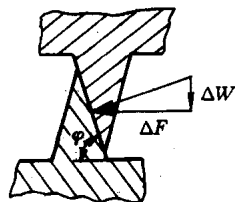


图 1-2 机械啮合模型

作用力是一个重要因素。可以说这是他第一次用分子作用或“分子说”来解释摩擦起因。以后又陆续有尤因 (J. A. Ewing, 1892 年)、哈迪 (W. B. Hardy, 1919 年)、普朗德 (L. Prandtl, 1928 年)、汤林森 (G. A. Tomlinson) 等人用这种学说来解释摩擦起因。

汤林森认为接触表面分子间电荷力所产生的能量损耗是摩擦的起因, 进而推导出阿芒摩擦公式中的 μ 值。

两表面接触时, 一些分子产生斥力 P_i , 另一些分子产生吸力 P_p , 则平衡条件为

$$W + \sum P_p = \sum P_i$$

$\sum P_p$ 数值很小, 可以略去, 若接触分子数为 n , 每个分子的平均斥力为 P , 因而得

$$W = \sum P_i = nP$$

在滑动中接触的分子连续转换, 即接触的分子分离, 同时形成新的接触分子, 而且始终满足平衡条件。接触分子转换所引起的能量损耗应当等于摩擦力做功, 故

$$\mu W x = kQ$$

式中 x ——滑动位移;

Q ——转换分子平均损耗功;

k ——转换分子数, 且

$$k = qnx/l$$

这里, l 为分子间的距离; q 为考虑分子排列与滑动方向不平行的系数。

将以上各式联立可以推出摩擦系数为

$$\mu = Qq/pl$$

分子作用理论是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, 即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。

3. 分子-机械摩擦理论

20 世纪 30 年代末是发展固体摩擦理论的一个兴旺时期, 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。

在英国从 1938 年起, 鲍登 (F. P. Bowden) 和他的学生在英国皇家学会学报上发表了三篇揭露外摩擦本质的创造性论文。他们首先在滑动条件下测量了真实接触面积; 查明了在接触斑点上产生高温闪燃的原因; 建立了在两摩擦面间产生焊合“结点”的原理。以这些为基础, 在随后 30 年间发展了粘着摩擦理论。

从 1939 年起苏联发表了一系列论文。以摩擦力不仅取决于是否克服两个接触面间分子相互作用力, 而且还取决于因粗糙面微凸体的犁沟作用而引起的接触体形貌畸变 (可逆或不可逆) 的概念为基础, 逐步发展成了摩擦二项式定律。

粘着摩擦理论和摩擦二项式定律都是现在固体摩擦的理论基础。

(二) 粘着摩擦理论

鲍登和泰伯 (D. Tabor) 经过系统的实验研究, 建立了较完善的粘着摩擦理论, 对于摩擦学研究具有重要的意义。下面就基本要点、修正的粘着理论和犁沟效应三部分予

以介绍。

1. 基本要点

(1) 摩擦表面处于塑性接触状态 当在物体上施加法向负荷时, 滑动表面的微凸体顶端发生接触, 先产生弹性变形, 然后在峰点接触处的应力达到压缩的屈服极限 σ_s 而产生塑性变形。接触点的塑性变形引起实际接触面积增加, 直至此面积能够承受所加载荷时为止。由于接触点的应力值为摩擦副中较软材料的屈服极限 σ_s , 实际接触面积为 A , 则

$$W = A\sigma_s \quad A = W/\sigma_s \quad (1-1)$$

(2) 滑动摩擦是粘着与滑动交替发生的粘滑过程 在开始产生金属与金属接触的区域内, 将发生粘着; 在摩擦时接触点还可能产生瞬间高温, 促使两金属产生粘着。两金属在切向力的作用下相对滑动, 粘着结点又将被剪切。滑动摩擦就是粘结点的形成和剪切交替进行的粘滑过程。

图 1-3 所示为在鲍登-列宾仪上测定的软钢在钢上滑动(干摩擦)的典型记录^[5]。可以看到, 滑动不是平稳的而是跃动式的。在 AB 间隔内, 滑块与下端表面粘着并一起移动, 在滑块上的拉力平稳地增加, 到 B 点时滑块脱开并迅速地滑脱到 C 点的位置, B 点的摩擦值最大, 实质上就是表面间的静摩擦。当达到 C 点时, 表面又粘着在一起。实验还证明, 当滑动速度增加时, 粘着时间和摩擦系数的变化幅度都将减小, 因而摩擦系数值和滑动过程趋于平稳。

(3) 摩擦力是粘着效应和犁沟效应产生阻力的总和 图 1-4 所示为摩擦力模型。硬表面的粗糙峰在法向载荷的作用下嵌入软表面中, 并假设粗糙峰的形状为半圆柱体。这样,

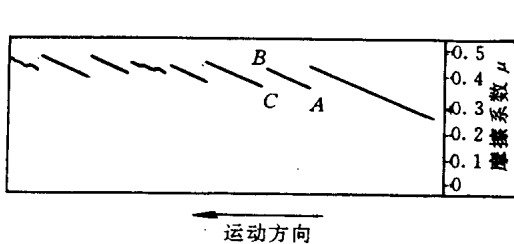


图 1-3 软钢对钢滑动的典型摩擦系数

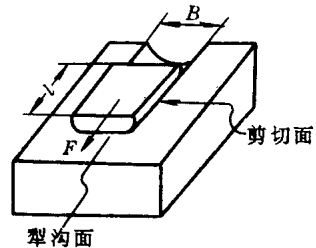


图 1-4 摩擦力模型

接触面积由两部分组成: 一为圆柱面, 它是发生粘着效应的面积; 另一为端面, 这是犁沟效应的面积, 滑动时硬峰推挤软材料。所以, 摩擦力 F 的组成为

$$F = T + P_c = A\tau_b + Sp_c \quad (1-2)$$

式中 T ——剪切力, $T = A\tau_b$;

P_c ——犁沟力, $P_c = Sp_c$;

A ——粘着面积, 即实际接触面积;

τ_b ——粘着点的剪切强度;

S ——犁沟面积;

p_c ——单位面积的犁沟力。

实验证明, τ_b 的数值与滑动速度及润滑状态有关, 并且十分接近摩擦副中软材料的剪切强度极限, 这表明粘着结点的剪切通常发生在软材料内部。 p_c 的数值决定于软材料性