

润滑材料与润滑技术

颜志光 主编



中国石化出版社

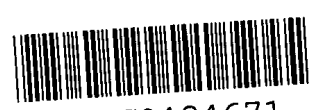
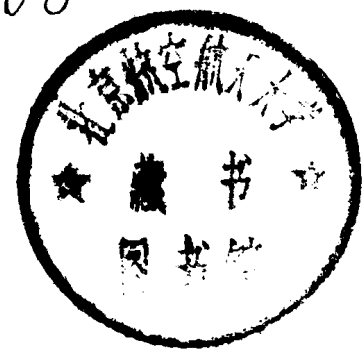
TH117-2
01

00008841

润滑材料与润滑技术

颜志光 主编

Hk 68/08



C0484671

中国石化出版社

内 容 提 要

本书由多年从事润滑材料和润滑技术研究的专家编写。书中详细介绍了新近开发的和正在有效应用的各种润滑材料,包括矿物润滑油、合成润滑油、润滑脂、固体润滑剂和金属加工润滑剂等;着重介绍每种润滑材料的性能特点、规格标准和应用技术实例;同时还叙述了摩擦学的基本理论概念、分析测试技术、润滑与密封新技术、润滑管理知识、废油回收和再生技术等重要问题。

本书是从事润滑剂研究、生产、使用和教学的科技人员,特别是从事机械设备润滑管理和机械设计人员的重要参考读物,也适合做继续工程教育的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

润滑材料与润滑技术/颜志光主编. -北京:中国石化出版社,1999

ISBN 7-80043-825-2

I. 润… II. 颜… III. ①润滑剂②润滑-技术 IV. TE62 6.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 41879 号

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271859

<http://press.sinopec.com.cn>

金剑照排厂排版

海丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所经销

*

787×1092 毫米 16 开本 24.75 印张 630 千字印 1—2000

2000 年 1 月第 1 版 2000 年 1 月第 1 次印刷

定价:43.00 元

《润滑材料与润滑技术》主编及编著者

主 编 颜志光

编著者 颜志光 党鸿辛 闫邱褪均

汪德涛 聂明德 李 辉

前 言

随着科学技术的发展，润滑材料和润滑技术不断迅速更新。国内外大量实践经验证明：采用先进润滑材料和润滑、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，提高机械效率，减少维修及停工损耗，节约能源和减少材料消耗，提高综合经济效益。

我国自改革开放以来，各行各业引进了大量的先进机械设备和先进技术，许多进口设备都采用先进的润滑材料和密封技术，由于国内企业对润滑技术的重要性认识不足或对国产新型润滑材料不够了解，以致许多进口设备的润滑材料仍依靠进口，或者采用不适当的一般润滑材料代用，造成许多设备故障或不必要的经济损失。另一方面机械设计人员也由于对润滑材料专业的发展不够了解，因而仍采用过时的润滑材料和沿用旧标准，影响润滑技术的更新换代。因此，必须大力宣传和推广应用先进润滑材料和润滑、密封新技术，这就是编写本书的目的。

本书共分九章，其内容主要是介绍新近发展的和正在有效应用的各种润滑材料和润滑技术，包括矿物油、合成油、润滑脂、固体润滑剂和金属加工润滑剂等，着重介绍每种润滑材料的性能特点和应用实例，有些是国外的，但更多的是国内的。为了较易阐明润滑材料的性能特点对机械效能的影响，必然牵涉到一些摩擦学的基本理论概念和性能测试技术，因此在第一章介绍摩擦学基本知识，在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。第三章介绍矿物润滑油及添加剂的组成、性能特点、标准和应用技术。第四章介绍合成润滑油的分类、性能特点、标准和应用技术。第五章介绍润滑脂的分类、组成和结构特点及应用实例。第六章介绍固体润滑技术。第七章介绍金属加工中的润滑技术。润滑和密封是紧密相连的，为了更好地发挥润滑材料的功能，减少损耗和环境污染，必须采用适当的润滑方式和密封技术，因此在第八章中介绍密封和防漏技术。要搞好设备润滑，除了必须掌握和应用有关润滑和密封知识之外，还必须有科学的管理方法，因此在第九章中介绍润滑材料的贮存和管理方面的知识。同时为了提高经济效益，节约使用有限的石油资源，减少废润滑剂的排放污染，必须重视废油的回收和再生利用，因此在这章中特别介绍废油再生技术。希望这些内容能给读者以裨益。

参加本书编写的作者都是多年从事润滑材料和润滑密封技术研究的专家，他们是：中国科学院兰州化学物理所研究员、工程院院士党鸿辛执笔第一章和第六章，中国石化石油化工科学研究院闻邱提均教授级高级工程师执笔第三章，广州机床研究所汪德涛教授级高级工程师执笔第七章和第八章，中国科学院兰州化学物理所聂明德高级工程师执笔第六章，中国石化重庆一坪高级润滑油公司李辉高级工程师执笔第五章，其余各章则由本人编写。在编写过程中，文字力求通俗易懂，技术力求新颖实用，以便读者可根据自己的实际情况参考应用，促进我国设备润滑技术的更新和发展，达到节能和提高经济效益的目的。

由于本书内容专业跨度较大及本人专业水平所限，书中疏漏和错误之处肯定难免，敬请读者批评指正。

颜志光

目 录

第一章 摩擦、磨损、润滑的基本知识	1
第一节 摩擦	1
一、摩擦的定义.....	1
二、日常生活中的摩擦现象.....	1
三、摩擦的分类.....	3
四、摩擦定律.....	4
第二节 磨损	11
一、磨损的定义和磨损过程.....	11
二、磨损的分类.....	11
三、造成磨损的原因.....	14
第三节 润滑	18
一、润滑的定义.....	18
二、润滑的分类和形成条件.....	19
三、润滑方式及其选择.....	21
参考文献.....	22
第二章 润滑剂总论	23
第一节 润滑剂的基本功能	23
第二节 对润滑剂的基本性能要求	23
第三节 润滑剂的分类和选择	24
一、液体润滑剂.....	24
二、半固体润滑剂.....	24
三、固体润滑剂.....	25
四、气体润滑剂.....	25
第四节 润滑油的常用质量指标及其使用意义和相应测试方法	27
一、粘度.....	27
二、酸值(总酸值、中和值).....	29
三、总碱值.....	29
四、水溶性酸和碱.....	29
五、闪点.....	30
六、倾点和凝点.....	30
七、机械杂质.....	31
八、灰分.....	31
九、残炭.....	31
十、水分.....	31
十一、抗乳化性.....	32
十二、抗泡性.....	32
十三、蒸发度(蒸发损失).....	33

十四、腐蚀性	33
十五、氧化安定性	34
十六、润滑性	34
第五节 润滑脂的常用质量指标、使用意义及其相应测试方法	38
一、锥入度	38
二、滴点	39
三、分油	40
四、蒸发性	40
五、游离碱和游离酸	41
六、水分	41
七、机械杂质	41
八、机械安定性	42
九、氧化安定性	42
十、润滑性	43
十一、腐蚀性	43
参考文献	44
第三章 矿物润滑油	45
第一节 矿物润滑油的来源及其基本生产方法	45
一、矿物润滑油的来源	45
二、润滑油的精制工艺	46
三、润滑油基础油的理化性质	49
第二节 润滑油添加剂	54
一、清净分散剂	55
二、抗氧化剂和抗氧化抗腐剂	56
三、降凝剂	57
四、粘度指数改进剂	58
五、油性剂和极压抗磨剂	60
六、防锈剂	61
七、抗泡剂	63
八、抗乳化剂	63
第三节 润滑油的分类、性能及应用	64
一、内燃机油	64
二、齿轮油	82
三、液压油	96
四、压缩机油、冷冻机油和真空泵油	115
五、全损耗系统用油	137
六、主轴油和导轨油	140
七、防锈油	144
八、热传导油(液)	152
九、电气绝缘油	155
参考文献	159
第四章 合成润滑油	160
第一节 合成润滑油的分类	160

第二节 合成润滑油的特点	160
第三节 各类合成润滑油的性能特点和应用范围	163
一、酯类油	163
二、聚醚	169
三、聚 α -烯烃(PAO)	177
四、硅油	180
五、氟油	183
六、磷酸酯	184
第四节 使用合成润滑油的技术经济意义	189
参考文献	192
第五章 润滑脂	193
第一节 润滑脂的使用特点	193
一、润滑脂的定义	193
二、润滑脂的触变性	193
三、润滑脂的优点和局限性	193
第二节 润滑脂的组成	194
一、基础油	194
二、稠化剂	198
三、添加剂和填料	211
第三节 润滑脂的应用	214
一、润滑脂的选择	214
二、润滑脂的合适用量	218
三、润滑脂在汽车上的应用	219
四、润滑脂在冶金工业中的应用	228
五、润滑脂在石油化工、纺织印染行业的应用	240
六、润滑脂在油气田的应用	252
七、润滑脂在铁路机车及轮轨上的应用	261
八、润滑脂在造纸工业中的应用	266
九、几种特殊高温部位的脂润滑	268
十、润滑脂的质量管理和包装、贮存、使用中应注意的问题	270
参考文献	271
第六章 固体润滑	273
第一节 定义和分类	273
一、定义	273
二、固体润滑剂的分类	273
第二节 对固体润滑剂的基本性能要求和测试方法	276
一、固体润滑剂的基本性能	276
二、固体润滑剂的性能测试方法	277
第三节 几种常用固体润滑剂的特点	291
一、石墨及其同素异构体和层间化合物	291
二、二硫属化合物	295
三、PTFE及其它塑料	297
四、软金属、氧化物、氟化物及其它固体润滑剂	299

第四节	固体润滑剂的应用范围和使用方法	301
一、	固体润滑剂的应用范围	301
二、	固体润滑剂的使用方法	302
	参考文献	315
第七章	金属加工润滑	316
第一节	金属切削过程的摩擦特点和润滑冷却剂的作用	316
一、	金属切削过程的摩擦特点	316
二、	金属切削冷却液的作用	317
第二节	金属切削冷却液分类和组成	319
一、	油基切削液分类	320
二、	油基切削液组成	322
三、	水基切削液分类	323
四、	水基切削液组成	324
第三节	金属切削冷却液的选择和应用	324
一、	金属切削冷却液选择原则	324
二、	油基切削液与水基切削液使用上的区别	325
三、	根据机床要求选择切削液	326
四、	根据刀具材料选择切削液	326
五、	根据工件材料选择切削液	327
六、	根据加工方法选择切削液	328
七、	选择切削液的经济分析	329
第四节	金属成形加工过程的润滑	329
一、	金属成形加工的摩擦学特点	329
二、	金属成形加工过程中润滑剂的作用	330
第五节	金属成形加工润滑剂	331
一、	金属成形加工用油(液)分类和组成	331
二、	金属成形加工用油(液)选择原则	331
第六节	金属加工润滑剂的质量控制与管理	335
一、	金属加工润滑剂标准的 ISO 草案	335
二、	切削液切削性能的评定方法	338
三、	维护与管理	339
	参考文献	342
第八章	密封与防漏	343
第一节	密封基本原理	343
一、	静密封的密封作用	343
二、	接触式密封的密封作用	344
第二节	密封的分类与其特性	345
一、	常用密封的分类与其特性	345
二、	常用密封材料的分类与其特性	351
三、	常用密封胶的分类与其特性	355
第三节	常用密封的选择	355
一、	对密封设计及选用的基本要求	355

二、正确选用密封件	356
三、液态密封胶及其使用部位的选用	356
四、厌氧胶的应用范围和特征	357
第四节 常用防漏治漏方法	358
一、设备泄漏的原因	358
二、常用的防漏治漏的基本方法	358
参考文献	359
第九章 润滑管理	360
第一节 润滑管理中常见问题	360
第二节 加强润滑管理的基本要求	361
第三节 废油回收与再生	364
一、废油再生的意义	364
二、废油再生工艺	365
三、废油再生中的污水处理	374
附录一	376
附录二	384

第一章 摩擦、磨损、润滑的基本知识

第一节 摩擦

一、摩擦的定义

所谓摩擦，就是在外力作用下，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。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。近几年来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，但直至现在并没有广泛承认的预测摩擦的理论，其主要问题是摩擦与在界面上发生的许多复杂过程有关。这里仅就日常生活中的摩擦现象、摩擦的分类和有关的摩擦定律简述如下。

二、日常生活中的摩擦现象

大家都有这样的体验：如果把一盏平底台灯放在桌子上，它就留在原位不动。如果要使台灯动，可以采取两种办法：或把桌子一边抬起使台灯滑下来；或者用一定的推力把台灯推动。移动的阻力是由台灯和桌子之间的摩擦引起的，使台灯移动所加的力称为摩擦力，或简称摩擦。两个物体之间的摩擦取决于一些因素。例如，使台灯在桌子上滑动要比使重柜在地板上滑动容易得多。另一方面，使冰块滑动要比使同重量的木块滑动来得容易。很明显，摩擦既取决于材料的特性，又取决于材料的重量。

在某些情况下，我们必须知道摩擦的大小。例如在设计汽车车闸时，我们必须知道车闸怎样才能有效地刹住汽车，这取决于闸瓦材料和闸轮之间的摩擦。又如，要在潮湿或泥泞的道路上刹住汽车，我们必须知道车轮和路面之间的摩擦，因为如能非常有效地刹住车轮而使它们不转，汽车就会在道路上自由溜滑。在汽车上应用的另一个实例是门锁，其中摩擦可起重要的作用。门锁是一种精巧复杂的机构，其中有许多可动零件的连杆，它们都会产生一点摩擦阻力，锁舌必须牢靠地固定在锁的拨盘中，但整个机构必须灵活自如，以至小孩用手指也能开启。如果其中可动零件之间的摩擦太大，那么力气正常的人也将无法应用。

再举另外两个例子来说明我们必须知道摩擦有多大。在陀螺仪中，有一个作高速旋转的微小圆柱体。为了能够良好地运转，该陀螺仪必须保持恒定不变的高转速。因此，摩擦必须尽可能小，而且要非常稳定。另一个尺寸截然不同的例子是发电站或水力发电站用的大型涡轮发电机。现在使用的新型机器虽然经过精心设计，但是轴承中仍有一点摩擦，虽然这种摩擦可能较小，但因机器很大，所以为克服摩擦而损耗的功率实际上可能很大。这时，稍微减小一点摩擦就可以大大节约功耗。

在运转的机器中，摩擦是有害的，因而曾经想方设法减小摩擦。一种方法是采用特殊的减摩材料，如利用磁控溅射 MoS_2 膜，在真空中可得出最低的摩擦系数为 0.007；或者用润滑

油或润滑脂来润滑表面；另一种方法是进行巧妙的设计，如把滑动改为滚动，就可以减少摩擦；如果再要求高一些，则用磁悬轴承或空气轴承，但这种轴承需要某些复杂的控制系统和定位系统，即使它们得到成功的应用，其起停时也还需要高质量的固体润滑膜来润滑。

1966年英国乔斯特报告提出，通过对英国的工业调查，应用已有的摩擦学知识，每年可节约5.5亿英镑，约占当时英国国民总产值的1%左右。尔后，美国、前苏联、日本、德国、加拿大等主要工业发达国家都进行了类似的调查，得出相近似的估计，即每年可节约国民总产值的1%。在现代汽车中，有20%的功率为克服摩擦而耗损掉；在飞机的活塞式发动机中损耗10%；在现代涡轮喷气机中损耗1.5%~2%。据资料报道，世界能源大约有1/3最终表现为某种形式的摩擦而消耗。在这种情况下，能量损耗是一种损失，但还不是主要的麻烦。主要的麻烦在于某种重要零件因摩擦、磨损或失效而造成损坏。据一些欧美国家统计，约有50%以上的失效机械零件是由于磨损引起。除磨损本身外，摩擦还会导致过度发热。大家都知道钻木取火的道理，如果使两块木头相互摩擦，木头就会着火。当飞机着陆时，如果我们注意观察飞机机闸，就会发现闸瓦和闸轮将产生红热现象。即使磨损很轻，这样高的温度也会引起机闸材料变质，并使制造闸轮用的金属变软。当汽车发动机的活塞环沿汽缸内壁滑动时，高温会使润滑剂失效，从而使金属零件的磨损加剧。摩擦所造成的磨损和发热，可能是限制飞机发动机和其他复杂机器的工作能力或缩短它们寿命的最重要原因。

既然摩擦力如此有害，失去了摩擦力将是如何？回答是：人不能行走，放在桌上的东西要滑掉，书桌和饭桌也都跑动起来。火柴和打火机无法使用，好好地挂上闸停放着的汽车或火车突然开动起来。钉子和楔子一齐自行拔出，几乎所有的建筑物轰隆隆地倒塌下来。用螺钉结实地拧紧的东西也不灵了，因为螺钉螺栓也是利用了摩擦的缘故。岂止是这样，倒塌的建筑物和家具、汽车等所有一切连同一起顺着稍微倾斜的面往越来越低的地方迅滑下去，很可能把最低层的角落掩埋。到那时，你可能会想到住在高山上就完全了吧，这又是想得太天真了。山耸立于高空得以炫耀其雄姿，也是依靠了岩石、砂、土之间的摩擦。总而言之，要是没有摩擦就会不得了。

可见，摩擦在某些场合却大受欢迎。汽车的滑动与制动器有关，是当前安全技术面临的大问题。其他一些例子有：

(1) 鞋子和地板之间的相互作用。如果它们之间完全没有摩擦，我们就无法穿普通鞋子走路或用手走路，而只能像章鱼那样利用吸盘贴着地板逐步爬行。

(2) 汽车轮胎和路面之间的相互作用。没有摩擦，我们就无法驱动车轮使汽车行使，而车轮将仅仅发生打滑。这时，我们只能用嵌齿车轮沿波纹面轨道运行，就象缆索铁道中所用的齿条和齿轮那样。

(3) 纺织品中各纱线之间的摩擦。各纱线不是用任何粘结剂而是靠它们之间的摩擦粘在一起的。

(4) 编织时把两根线绳结在一起时结头的效用。正是结头中两连接件之间的摩擦才使它们结在一起。对于正确设计的结头，把绳拉得越紧，结头中的摩擦就越大，因而越不容易松掉。如果摩擦太小，结头就结不牢。

(5) 打入木头内的钉子和木头之间的相互作用。钉子使木头分开，从而能入木头。因此，木头就紧压钉子的表面。如果摩擦很小，钉子就会从木头中挤出来，这同我们能用两个手指挤一粒果仁而使它飞到很远一样。

(6) 螺母和螺栓之间的扣紧。当螺母旋紧时，它压紧螺栓的螺纹面。正是两个相互压紧

的螺纹面之间的摩擦才使得螺母扣紧。没有摩擦螺母就扣不紧。

实际上，在我们周围的大部分固体的摩擦系数，既非是零又不是无限大，而具有某种范围的值。摩擦是怎样引起的？两个固体在滑动时其界面实际上发生什么情况？古代科学家做了不少的努力，19世纪中有分析与实践能力的工程技术人员全都研究过这个问题。但是，只是在近五六十年，物理学家、化学家、冶金学家和工程技术人员才比较有效地解决了这个问题。研究摩擦需要采取跨学科的研究方法，因为摩擦是许多过程相互作用的结果，虽然摩擦的测量是很简单的，但解释清楚却很困难。近30多年来，由于摩擦、磨损和润滑越来越受到人们的重视，因此，由英国的科学家创造了一个新名词“摩擦学”来描述这个领域。这个名词是从意思是“摩擦”的希腊字 *tribos* 派生而来。摩擦学的定义是：“研究作相对运动的相互作用表面及有关实践的一门科学技术”。

摩擦是由于两个固体在实际接触区相互作用而引起的。为了搞清楚摩擦，我们必须研究表面的形状和轮廓、两表面相互压紧时的变形方式、固体是怎样粘附的、界面的强度性能、表面膜的作用以及表面在滑动中变形时能量是怎样损耗的。现在首先谈谈摩擦的分类。

三、摩擦的分类

人们在研究摩擦时往往涉及不同的摩擦。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。

(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、 MoS_2 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。如图 1-1 (a) 所示。

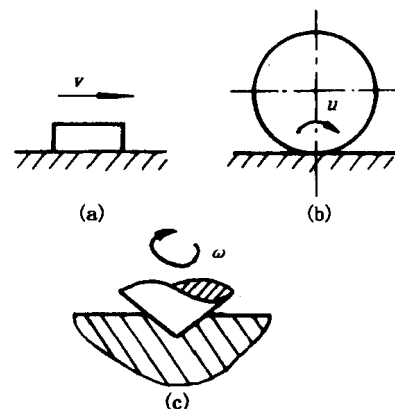


图 1-1 摩擦形式
a—滑动摩擦；b—滚动摩擦；
c—自旋摩擦

2. 滚动摩擦

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

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。如图 1-1 (c)所示。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,对干摩擦定义:“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时的摩擦。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。

四、摩擦定律

(一) 摩擦定律概述

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看法。对于滑动摩擦可归纳为机械啮合定律、分子作用定律和分子-机械摩擦定律三类。对于滚动摩擦机理也进行了一些研究。

1. 机械啮合定律

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200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”,按现代用语来说就是摩擦系数约为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。所提出的最简单的

摩擦模型，如图 1-2 中所示。摩擦力为

$$F = \Sigma \Delta F = \operatorname{tg} \varphi \Sigma \Delta W$$

$$F = fW$$

摩擦系数 $f = \operatorname{tg} \varphi$ ，是由表面状况确定的常数。

库伦通过实验于 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，与外表的接触面积之大小无关；

(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。

这三条被命名为库伦定律。实际上，如上所述，早在库伦之前约 100 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-库伦定律。

库伦与阿芒汤一样，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”，或称机械啮合定律。

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. 分子作用定律

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起因，进而推导出阿芒汤摩擦公式中的 f 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

$$W + \Sigma P_p = \Sigma P_i$$

ΣP_p 数值很小，可以略去。若接触分子数为 n ，每个分子的平均力为 P ，因而得

$$W = \Sigma P_i = nP$$

在滑动中接触分子连续转换，即接触分子分离，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

$$fWX = KQ$$

式中， X 为滑动位移， Q 为转换分子平均损耗功； K 为转换分子数，且

$$K = qn \frac{X}{l}$$

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

$$f = \frac{qQ}{Pl}$$

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。

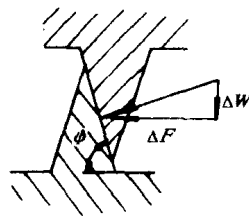


图 1-2 机械啮合模型

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-机械摩擦定律

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，在原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年间发展成了粘着摩擦理论。

在原苏联从1939年起发表了一系列论文。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。现在分为基本要点、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 接触点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

$$W = A\sigma_s \quad A = \frac{W}{\sigma_s} \quad (1-1)$$

(2) 滑动摩擦是粘着与滑动交替发生的粘滑过程 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。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少，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是摩擦力模型。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

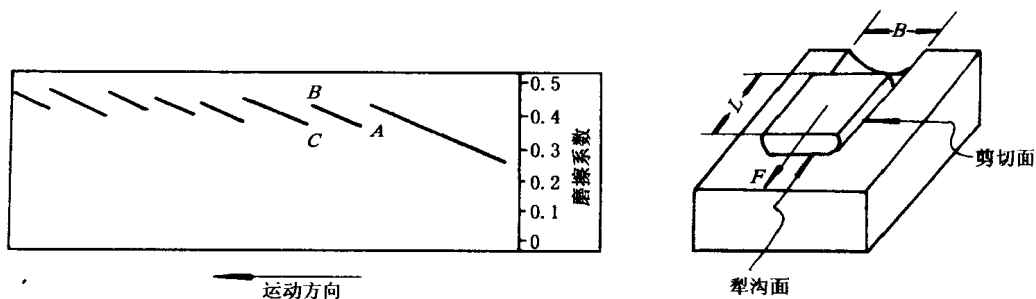


图 1-3 钢对钢滑动的典型摩擦系数

图 1-4 摩擦力模型

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

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质, 通常与软材料的屈服极限成正比, 而硬峰嵌入深度又随软材料屈服极限的增加而减小。对于球体嵌入平面, 可推得犁沟力 P_c 与软材料屈服极限的平方根成反比, 即软材料越硬, 犁沟力越小。

对于金属摩擦副, 通常 P_c 的数值远小于 T 值。粘着理论认为, 粘着效应是产生摩擦力的主要原因。如果表面不太粗糙而又未加液体润滑剂, 则 P_c 较小, 故可忽略犁沟效应, 式(1-2)变为

$$F = A\tau_b = \frac{W}{\sigma_s} \tau_b$$

$$f = \frac{F}{W} = \frac{\tau_b}{\sigma_s} = \frac{\text{软材料的剪切强度极限}}{\text{软材料的压缩屈服极限}} \quad (1-3)$$

以上是简单粘着理论。根据式(1-2)得出的摩擦系数与实测结果不相符合, 例如大多数金属材料的剪切强度与屈服极限的关系为 $\tau_b = 0.2\sigma_s$, 于是计算的摩擦系数 $f = 0.2$ 。事实上许多金属摩擦副在空气中的摩擦系数可达 0.5, 特别在高真空环境下的洁净表面摩擦时则更高。为此, 鲍登与泰伯对这个简单粘着理论作了进一步修正。

2. 修正的粘着理论

在简单的粘着理论中, 分析实际接触面积时只考虑压缩屈服极限 σ_s , 而计算摩擦力时又只考虑剪切强度极限 τ_b , 这对于静摩擦可能是合理的。但对于滑动摩擦, 由于存在切向力, 接触点发生屈服是由于法向载荷与剪切力联合作用的结果。于是根据强度理论的一般规律, 假设当量应力的形式为

$$\sigma^2 + \alpha\tau^2 = K^2 \quad (1-4)$$

式中 α ——待定常数, $\alpha > 1$;

K ——当量应力。

α 和 K 的数值可以根据极端情况来确定。一种极端情况是 $\tau = 0$, 即静摩擦状态, 此时接触点的应力为 σ_s , 所以 $\sigma_s^2 = K^2$, 式(1-4)可写成

$$\sigma^2 + \alpha\tau^2 = \sigma_s^2$$

$$\text{即} \quad \left(\frac{W}{A}\right)^2 + \alpha\left(\frac{F}{A}\right)^2 = \sigma_s^2 \quad (1-5)$$

$$\text{或} \quad A^2 = \left(\frac{W}{\sigma_s}\right)^2 + \alpha\left(\frac{F}{\sigma_s}\right)^2 \quad (1-6)$$

另一种极端情况是使切向力 F 不断增大, 由式(1-6)可知实际接触面积 A 也相应增加, 直至相对于 $\frac{F}{A}$ 而言 $\frac{W}{A}$ 的数值甚小, 可以略去, 则由式(1-5)得

$$\alpha\tau_b^2 \approx \sigma_s^2 \Rightarrow \alpha = \sigma_s^2 / \tau_b^2 \quad (1-7)$$

因为大多数金属材料满足 $\tau_b = 0.25\sigma_s$, 可求得 $\alpha = 25$ 。但由实验证实, α 应小于 25, 鲍