



普通高等教育“十三五”规划教材

中国石油和石化工程教材出版基金资助项目

# 润滑油 工业生产原理

宋 军 / 编著



中國石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

普通高等教育“十三五”规划教材

中国石油和石化工程教材出版基金资助项目

# 润滑油工业生产原理

宋 军 编著



中國石化出版社

## 内 容 提 要

本书系统阐述了润滑油基础油生产的原理和过程。主要包括：润滑油的基础知识；传统“老三套”以及加氢法生产矿物润滑油基础油工业装置的生产原理、工艺流程、主要设备及操作注意事项等相关知识；合成润滑油基础油的种类、生产过程；润滑油添加剂的种类和作用机理；润滑油调和的机理、工艺。

本书可作为高等院校化学工程与工艺、精细化工、应用化学等专业的本科学生以及高等职业技术教育学生的教材，也可作为广大从事润滑油研发、生产的科技工作者和石油产品经销人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

润滑油工业生产原理 / 宋军编著. —北京：中国石化出版社，2019.1  
普通高等教育“十三五”规划教材  
ISBN 978-7-5114-5199-6

I. ①润… II. ①宋… III. ①润滑油-生产工艺-高等学校-教材 IV. ①TE626.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 026056 号

未经本社书面授权，本书任何部分不得被复制、抄袭，或者以任何形式或任何方式传播。版权所有，侵权必究。

### 中国石化出版社出版发行

地址：北京市朝阳区吉市口路9号  
邮编：100020 电话：(010)59964500  
发行部电话：(010)59964526  
<http://www.sinopec-press.com>  
E-mail: [press@sinopec.com](mailto:press@sinopec.com)  
北京柏力行彩印有限公司印刷  
全国各地新华书店经销

\*

787×1092 毫米 16 开本 12 印张 298 千字  
2019 年 3 月第 1 版 2019 年 3 月第 1 次印刷  
定价：40.00 元

# 前 言

两个作相对运动的物体表面都会产生不同程度的摩擦，摩擦会产生磨损和热，即摩擦是客观存在，磨损是摩擦的必然结果，而润滑是降低摩擦、减轻磨损、节能降耗的有效技术措施。

20 世纪上半叶，经过两次世界大战的洗礼，润滑油工业步入了现代化的里程。发达国家的专家学者在他们的专著中描述了当时润滑油工业体系的形成和生产工艺。目前，世界润滑油工业无论在制造技术、生产规模、品种质量以及应用技术上，都有了很大发展和创新。我国润滑油工业起步较晚，经过几十年的探索，获得了长足的进步，已跻身于世界矿物润滑油生产大国的行列。培养我国现代化的炼油工业需要的后备技术人员一直是石油高等院校的重要工作，而“润滑油加工与利用”是化学工程和相关专业学生的一门重要的专业基础课。

在多年的教学过程中，笔者发现，虽然有关润滑油及其添加剂方面的专著、教材已不少，但这些书往往侧重于某一方面的论述，而能够系统地反映本门专业课内容、并与高等院校教学大纲及教学学时相适应的教材却没有，学生亟需一本能够系统全面了解润滑油相关知识的教科书。《润滑油工业生产原理》正是为了适应这一要求，并结合化学工程与工艺、应用化学等专业的实际需要，在广泛参考相关资料的前提下，以讲稿为主线，经提炼、修改完善而编撰成书的。

本书共分 6 章，内容涵盖润滑油基本知识、润滑油基础油生产工艺、润滑油添加剂及润滑油的调和等内容。通过本教材的学习，能够使读者对滑油润滑油的工业生产过程、原理有较系统、全面的了解。本书可作为高等院校教材，亦可作为石油化工、润滑油行业等有关工程技术人员、管理人员的参考书。

本书在编写过程中参考并引用了有关图书文献资料，在此特向作者表示衷心的感谢！

由于编者能力和水平有限，书中难免存在疏漏和不妥之处，敬请广大读者和专家不吝赐教，指点谬误，在此亦表谢忱！

# 目 录

第 1 章 润滑油基础知识	( 1 )
1.1 摩擦、磨损与润滑	( 1 )
1.1.1 摩擦	( 1 )
1.1.2 磨损	( 3 )
1.1.3 润滑	( 6 )
1.2 润滑油的分类、作用和质量要求	( 11 )
1.2.1 润滑油的分类标准	( 11 )
1.2.2 润滑油的作用	( 12 )
1.2.3 质量要求	( 13 )
1.3 润滑油的应用	( 14 )
1.3.1 内燃机润滑油	( 14 )
1.3.2 工业润滑油	( 18 )
1.3.3 特种润滑油	( 24 )
1.4 润滑油的主要使用性能与化学组成的关系	( 28 )
1.4.1 润滑油的化学组成	( 28 )
1.4.2 黏度与化学组成的关系	( 29 )
1.4.3 黏温特性与化学组成的关系	( 31 )
1.4.4 低温流动性与化学组成的关系	( 34 )
1.4.5 抗氧化安定性与化学组成的关系	( 35 )
1.4.6 溶解能力与化学组成的关系	( 37 )
1.4.7 挥发性和化学组成的关系	( 38 )
1.4.8 残炭值与化学组成的关系	( 38 )
1.5 润滑油基础油的特性、分类及加工过程	( 39 )
1.5.1 基础油的特性	( 39 )
1.5.2 基础油的分类	( 41 )
1.5.3 加工过程	( 44 )
1.6 润滑油添加剂的作用及其分类	( 46 )
1.6.1 添加剂的作用	( 46 )
1.6.2 添加剂的分类	( 46 )
第 2 章 传统工艺生产矿物润滑油基础油	( 48 )
2.1 矿物润滑油工业发展简史	( 48 )
2.2 常减压蒸馏	( 50 )
2.2.1 减压蒸馏装置流程	( 50 )

2.2.2	减压精馏塔的工艺特征	( 51 )
2.2.3	干式润滑油减压蒸馏	( 52 )
2.3	溶剂脱沥青	( 53 )
2.3.1	概述	( 53 )
2.3.2	原理	( 54 )
2.3.3	工艺流程	( 55 )
2.3.4	影响因素	( 57 )
2.3.5	超临界技术的应用	( 60 )
2.3.6	主要设备	( 61 )
2.4	润滑油的溶剂精制	( 62 )
2.4.1	溶剂精制的原理	( 62 )
2.4.2	对溶剂的要求和溶剂的性质	( 63 )
2.4.3	精制过程的条件和影响因素	( 66 )
2.4.4	溶剂的回收原理及过程	( 75 )
2.5	润滑油的溶剂脱蜡	( 78 )
2.5.1	概述	( 78 )
2.5.2	脱蜡原理	( 79 )
2.5.3	工艺流程	( 83 )
2.5.4	脱蜡过程的影响因素	( 88 )
2.6	白土吸附	( 92 )
2.6.1	原理	( 93 )
2.6.2	工艺流程	( 93 )
2.6.3	影响因素	( 94 )
<b>第 3 章</b>	<b>加氢法生产矿物润滑油基础油</b>	<b>( 96 )</b>
3.1	概述	( 96 )
3.1.1	化学反应	( 96 )
3.1.2	润滑油加氢催化剂	( 97 )
3.2	润滑油加氢补充精制	( 98 )
3.2.1	工艺方案	( 98 )
3.2.2	化学反应	( 99 )
3.2.3	催化剂	( 100 )
3.2.4	工艺流程	( 102 )
3.2.5	操作条件	( 103 )
3.3	加氢脱蜡	( 104 )
3.3.1	概述	( 104 )
3.3.2	反应原理	( 105 )
3.3.3	工艺流程	( 106 )
3.3.4	催化剂	( 108 )
3.4	润滑油加氢处理	( 110 )
3.4.1	原理	( 111 )

3.4.2	催化剂	(112)
3.4.3	工艺流程	(113)
3.4.4	操作条件	(114)
<b>第4章</b>	<b>合成润滑油基础油的制备</b>	<b>(116)</b>
4.1	概述	(116)
4.1.1	合成油的分类	(116)
4.1.2	合成油的性能特点	(116)
4.1.3	合成油的应用	(119)
4.2	聚 $\alpha$ -烯烃合成基础油	(120)
4.2.1	化学反应	(120)
4.2.2	生产技术	(121)
4.2.3	性能特点	(123)
4.2.4	应用	(124)
4.3	合成酯类油	(124)
4.3.1	化学反应	(125)
4.3.2	生产过程	(125)
4.3.3	性能特点	(126)
4.3.4	应用	(127)
4.4	聚醚合成油	(128)
4.4.1	生产工艺	(128)
4.4.2	性能	(130)
4.4.3	应用	(131)
4.5	其他合成基础油的制备	(132)
4.5.1	硅油	(132)
4.5.2	磷酸酯	(134)
4.5.3	含氟油	(136)
<b>第5章</b>	<b>润滑油添加剂</b>	<b>(138)</b>
5.1	概述	(138)
5.2	清净剂	(139)
5.2.1	组成结构	(139)
5.2.2	作用机理	(139)
5.2.3	品种及发展趋势	(141)
5.3	分散剂	(143)
5.3.1	概述	(143)
5.3.2	组成结构	(144)
5.3.3	作用机理	(145)
5.3.4	品种	(145)
5.4	载荷添加剂	(146)
5.4.1	油性剂(摩擦改进剂)	(146)

5.4.2 极压抗磨剂 .....	(149)
5.5 抗氧抗腐剂 .....	(152)
5.5.1 作用机理 .....	(152)
5.5.2 发展趋势 .....	(156)
5.6 黏度添加剂 .....	(157)
5.6.1 概述 .....	(157)
5.6.2 作用机理 .....	(158)
5.6.3 品种及应用 .....	(158)
5.7 降凝剂 .....	(160)
5.7.1 概述 .....	(160)
5.7.2 作用机理 .....	(161)
5.7.3 品种及应用 .....	(161)
5.8 防锈添加剂 .....	(163)
5.8.1 概述 .....	(163)
5.8.2 作用机理 .....	(163)
5.8.3 种类 .....	(164)
5.9 抗泡剂 .....	(166)
5.9.1 概述 .....	(166)
5.9.2 抗泡剂的种类 .....	(167)
5.9.3 作用机理 .....	(168)
5.10 复合添加剂 .....	(168)
5.10.1 复合添加剂及复合效应 .....	(168)
5.10.2 内燃机油复合添加剂 .....	(169)
5.10.3 齿轮油复合添加剂 .....	(170)
5.10.4 液压油复合添加剂 .....	(171)
5.10.5 自动传动液复合添加剂 .....	(172)
5.10.6 其他复合添加剂 .....	(173)
<b>第6章 润滑油的调和</b> .....	(174)
6.1 概述 .....	(174)
6.2 调和机理 .....	(174)
6.3 调和工艺 .....	(175)
6.3.1 罐式调和 .....	(175)
6.3.2 管道调和 .....	(177)
6.3.3 两种调和工艺的比较 .....	(178)
6.3.4 调和优化软件 .....	(178)
6.4 影响调和质量的因素 .....	(179)
6.5 调和指标计算 .....	(180)
<b>参考文献</b> .....	(182)

# 第 1 章 润滑油基础知识

世界能源的 1/3~1/2 最终以各种不同形式的摩擦消耗掉，因此，降低机械的摩擦损失，对节约能源至关重要。为了减小机械的摩擦和磨损，必须对机械表面的性状、摩擦和磨损的情形进行研究。

## 1.1 摩擦、磨损与润滑

### 1.1.1 摩擦

#### 1. 摩擦的定义

相互接触的物体在相对运动时或具有相对运动的趋势时，接触面间所产生阻碍其相对运动的阻力称为摩擦力，发生的现象则称为摩擦。

互相接触的物体相对运动时产生的摩擦现象，在生产实践中早就被人们注意到。早在 1519 年，达·芬奇就正确地阐述了有关摩擦力的概念。1699 年，法国工程师阿蒙顿归纳了两条有关摩擦的基本定律：第一，摩擦与两物体的接触面的大小无关；第二，摩擦阻力与垂直负荷成正比。

根据此定律得出摩擦力与负荷的关系：

$$\mu = F/P \quad (1-1)$$

式中  $\mu$ ——摩擦系数；

$F$ ——摩擦力，N；

$P$ ——摩擦面上的垂直负荷，N。

在一定条件下，摩擦系数  $\mu$  是一个常数，但摩擦系数与摩擦接触表面积、摩擦表面的材料、摩擦的种类和摩擦表面的加工精度等有关。如两块铜材在空气中的摩擦系数约为 0.6，石墨与石墨的摩擦系数在不太干燥的空气中约为 0.1，在很干燥的空气中超过 0.5。

摩擦现象是在两个摩擦表面之间产生的，摩擦力的大小与摩擦表面的相互作用有密切的关系。

#### 2. 摩擦的作用

在许多场合，摩擦对人类有利。比如，人们依靠摩擦来拿起和握住物品，房间内的家具依靠与地面的摩擦而保持在固定的位置，水龙头利用摩擦力而拧紧，钉子依靠摩擦力而固定在木材中以及人们生活中用刷子洗刷掉衣服上的污渍等。

#### 3. 摩擦的危害

在更多的情况下，摩擦是一个有害的因素，需要采取一定的措施进行限制，这在机械行业是一个十分普遍的问题。摩擦产生的危害主要体现在以下几个方面。

①在机械运转中造成大量的功率损耗，有时甚至能占功率消耗的50%~70%。

②摩擦会造成机械的严重磨损，特别是机械的研磨性磨损，从而导致机械的迅速损坏。

③机械在摩擦过程中会放出大量的热，使摩擦面温度急剧升高，降低了机件的机械强度，破坏其正常配合。

④在极端的干摩擦情况下，突出的接触点在高负荷和高温的作用下，会出现粘连现象，以至于机械被迅速熔融而烧毁。

除了传动皮带、摩擦轮等部件外，一般的机械部件都要求减小摩擦和磨损，以保证机械的正常、高效运转。

摩擦对人们的生活既有利又有害，这是一个客观规律。只要认真研究和了解摩擦的原因，并采取相应的措施，就能达到利用摩擦为人类造福和控制、减缓摩擦，提高机械效率，延长机器零件使用寿命的目的。

#### 4. 摩擦产生的原因

当两个金属表面被负荷压紧并发生相对运动时，阻碍运动进行的阻力就是产生摩擦的根本原因。

##### (1) 机械啮合

机械啮合由物体表面不平滑的凸起部分阻挡相互的运动而产生。任何实际存在的表面都不是绝对平滑的，一般都留有加工的痕迹，即使经过精密的加工，如研磨，其表面也只是相对光滑些，绝对光滑的表面是不存在的。

即使加工很“光滑”的零件表面，在显微镜的观察下也是凸凹不平的，有如地球表面的地貌一样，布满了高山和深谷。零件表面的这种凸凹不平的几何形状，称为表面形貌。

##### (2) 摩擦副表面产生的热量

当表面发生相对运动时，由于所有摩擦作用都发生在很小的实际接触面上，因此支撑点附近的表面温度会迅速升高，产生的热量造成局部的软化和熔化而使黏结力增大。因此发生相对运动特别是高速运动时撕裂黏结点要消耗更多的动力。

##### (3) 摩擦副相互接触部分的分子间引力

实践表明，摩擦力不一定随摩擦副表面的粗糙度降低而减小，有时反而增大。这是因为表面越光滑，相互接触的部分越多，分子间引力产生的摩擦阻力也越大。

#### 5. 摩擦的分类

摩擦的现象极为普遍，种类很多，根据对摩擦现象观察和研究的依据不同，可将摩擦划分为不同的类型。摩擦的分类通常按摩擦副的运动状态、运动形式和润滑状况来划分。

##### (1) 按摩擦副的运动状态分类

按摩擦副的运动状态分类，摩擦可分为静摩擦和动摩擦两种。

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，产生的摩擦称为动摩擦。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，而动摩擦则一般大于极限静摩擦。

## (2) 按摩擦副的运动形式分类

按摩擦副的运动形式分类,摩擦可分为滑动摩擦、滚动摩擦和自旋摩擦三种。

①滑动摩擦。一个物体在另一个物体上滑动时产生的摩擦称为滑动摩擦。如机床导轨的往复运动、曲轴在轴瓦套中的转动和活塞在汽缸内的运动等。

②滚动摩擦。圆柱形或球形的物体在另一物体上滚动时产生的摩擦称为滚动摩擦。如滚珠或滚柱在轴承中滚动等。

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,称为自旋摩擦。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。

## 6. 减小摩擦的措施

众所周知,减小摩擦的有效措施包括减小摩擦副间的压力及提高加工精度,降低摩擦面的粗糙程度。但是前者受制于机械构造和实际工况;而通过提高摩擦副间的光滑程度减小摩擦的效果也是有限的。前已述及,即使很“光滑”的摩擦面,在微观形貌上也是凸凹不平的,对于加工过于光滑的零件,摩擦面间突出的接触点的数量增多,分子或原子间的引力增大,导致相对运动时的摩擦阻力增大。实践证明,在很多情况下,采用润滑剂把两个摩擦面隔开(或部分隔开)是降低摩擦、减少磨损最行之有效的措施。

## 1.1.2 磨损

### 1. 磨损的原理

#### (1) 磨损的定义

两个物体作相对运动时,在摩擦力和垂直负荷的作用下,摩擦副的表层材料不断发生损耗的过程或者产生残余变形的现象称为磨损。

磨损是摩擦副运动所造成的,即使是经过润滑的摩擦副,也不能从根本上消除磨损。特别是在机械启动时,由于零件的摩擦表面上还没有形成油膜,就会发生金属间的直接接触,从而造成一定的磨损。

#### (2) 磨损的危害

摩擦副材料表面磨损后,往往造成设备精度丧失,需要进行维修,造成停工损失、材料消耗与生产率降低,尤其在现代工业自动化、连续化的生产中,由于某一零件的磨损失效甚至会影响到全线的生产。磨损是机械运转中普遍存在的一种现象,人们必须对磨损现象不断进行研究,寻求提高零件耐磨性和使用寿命以及控制磨损的措施,才能减少制造和维修费用。

#### (3) 磨损过程的三个阶段

机械摩擦副的磨损随使用时间的不同而不同。摩擦副从开始使用到完全失效的磨损过程大致可分为三个阶段,即跑合阶段、稳定磨损阶段和急剧磨损阶段,如图 1-1 所示。

①跑合阶段。跑合阶段又称磨合阶段,摩擦副在使用初期,在载荷的作用下,摩擦表面逐渐被磨平,实际接触面积逐渐增大,磨损速度开始很快,然后减慢,见图 1-1 中的  $oa$  段。

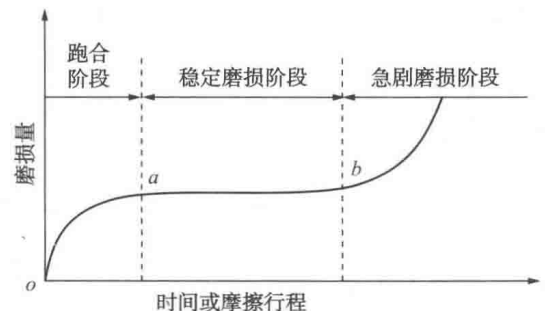


图 1-1 磨损过程的三个阶段

②稳定磨损阶段。经过跑合阶段的磨合，摩擦表面硬化，微观几何形状改变，从而建立了弹性接触的条件，这时磨损已经稳定下来，磨损量与时间成正比缓慢增加，见图 1-1 中的 *ab* 段。

③急剧磨损阶段。经过较长时间的稳定磨损之后，由于摩擦表面之间的间隙和表面形状的改变，以及产生金属晶格疲劳等情况，磨损速度急剧加快，直至摩擦副不能正常运转。当摩擦副工作达到这一阶段时，机械效率下降，精度降低，出现异常的噪声及振动，最后导致零件完全失效。

从磨损过程的变化来看，为了提高机械零件的使用寿命，应尽量延长稳定磨损阶段。但是，恶劣条件下的磨合磨损之后，可能会直接进入急剧磨损阶段，不能建立正常工作条件。

因此，对于新的机械设备保证良好的磨合是非常重要的。实践证明，良好的磨合能够使摩擦副的正常工作寿命延长 1~2 倍，而且还能有效地改善摩擦副的其他性能。例如对于滑动轴承，良好的磨合可改善表面形貌，更有利于建立流体动压润滑膜；发动机的合理磨合可提高汽缸活塞环的表面品质，减少擦伤痕迹，提高密合性，使发动机的耗油量降低。

良好的磨合性能表现为磨合时间短，磨合磨损量小，以及磨合后的表面耐磨性高。为了提高磨合性能，一般可选择合理的磨合规范。合理的磨合规范应当是逐步地增加载荷和摩擦速度，使表面品质得到改善，磨合的最后阶段应当接近使用工况。

## 2. 磨损的分类

根据磨损产生的原因和磨损过程的本质，磨损主要可分为四种类型，即黏着磨损、磨料磨损、疲劳磨损和腐蚀磨损。

### (1) 黏着磨损

当摩擦副接触时，由于表面不平发生点接触，在相对滑动和一定载荷作用下，在接触点发生塑性变形或剪切，使其表面膜破裂，摩擦表面温度升高，严重时表层金属会软化或熔化，此时，接触点产生黏着。在摩擦滑动中，黏着点被剪断，同时出现新的黏着点，如果黏着点被剪断的位置不是原来的交界面，而是在金属表层，则会造成材料的消耗，即黏着磨损。

根据黏着程度不同，黏着磨损情况也有差异。若剪切发生在黏着结合面上，表面转移的材料极轻微，则称“轻微磨损”；若剪切发生在摩擦副一方或两方金属较深的地方，称为“撕脱”，在一些高负荷的摩擦副表面可以看到这种现象。黏着磨损的磨损量与载荷大小、滑动的距离和材料的硬度等因素有关，通常与载荷大小和滑动的距离成正比，与材料的硬度成反比。

为了提高摩擦副的抗黏着磨损能力，通常可以使用不易相互黏附的金属作摩擦副材料，增加润滑油膜的厚度，以及在润滑油脂中加入油性和极压添加剂，提高润滑油的吸附能力和油膜的强度等方法。

### (2) 磨料磨损

磨料磨损是指硬的物质使较软的金属表面擦伤而引起的磨损。它包括两种类型，一种是粗糙的硬表面把较软表面划伤；另一种是硬的颗粒在两摩擦面间滑动引起摩擦副表面的划伤。

对于第一种情况，摩擦表面的磨损主要与材料表面的粗糙程度和两表面硬度的差异相

关。一般来讲，材料表面的光洁度越高，所造成划伤的情况就越轻微；两摩擦表面的硬度相差越大，就越容易使硬表面将软表面划伤。

硬的颗粒在摩擦面间引起的划伤，往往是因为摩擦面间混入了灰尘、泥沙、铁锈以及发动机中的焦末等，在黏着磨损、腐蚀磨损中产生的颗粒也能引起磨料磨损。磨料磨损是造成摩擦面磨损的一个重要类别。据统计，因磨料磨损而造成的损失，占整个工业范围内磨损损失的50%。因此，对机械摩擦副要特别注意保持摩擦面、润滑系统以及润滑油的清洁，防止混入杂质颗粒。

### (3) 疲劳磨损

黏着磨损和磨料磨损都是基于摩擦副表面直接接触，相接触的表面出现的材料损耗。金属磨损颗粒尺寸非常小，而且在摩擦副开始工作时就出现。还有一种磨损，在摩擦副工作的初期阶段一般不会发生，而发生在摩擦副经过长时期工作以后的阶段，其摩擦现象是较大的片状颗粒从材料上脱落，在摩擦表面上出现针状或豆瓣状的小凹坑，此磨损类型被称为疲劳磨损。

疲劳磨损通常出现在滚动形式的摩擦机件上，如滚动轴承、齿轮、凸轮以及钢轨与轮箍等。出现疲劳磨损的主要原因是滚动摩擦面上，两摩擦面接触的部位产生接触应力，表层发生弹性变形，而在内部产生较大的剪切应力。由于接触应力的反复作用，使得金属的晶格结构逐渐遭到破坏，当晶格结构被破坏到使材料承载强度低于载荷应力时，材料将会出现裂纹，而随着摩擦过程的进行，裂纹逐渐扩大，沿着最大剪应力的方向裂纹扩展到材料表面，最终使少量的材料从表面上脱落，在摩擦表面出现豆瓣状凹坑。

对于完善的、无缺陷的金属材料来说，在滚动接触的情况下，损坏的位置决定于出现最大剪应力的位置。如果还伴随着滑动，损坏的位置就移向表面。由于材料很少是完美无缺的，因此，发生损坏的位置就与材料中的杂质、孔隙、细小的裂纹以及其他因素有关。

工作一定时间后开始出现大的磨损碎片是疲劳磨损的特点，摩擦副一旦出现了疲劳磨损，就标志着使用寿命的终结。改善摩擦副的材质、减小接触点的接触应力和采用合适的润滑剂可以延缓疲劳磨损的出现。尤其是高黏度的润滑油不易从摩擦面挤掉，有助于接触区域压力的均匀分布，从而降低了最高接触应力值。例如某单位有两台同型号减速器，其中一台先投入生产，采用30号机械油润滑，运行两个月后出现疲劳磨损；另一台换用28号轧钢机油，由于提高了用油黏度，运行了一年半未出现疲劳磨损。

### (4) 腐蚀磨损

当摩擦在腐蚀性环境中进行时，摩擦表面会发生化学反应，并在表面上生成反应产物。一般反应产物与表面黏结不牢，容易在摩擦过程中被擦掉，被擦掉反应层的金属可又产生新的反应层，如此循环下去，会造成金属摩擦副材料很快地被消耗掉，这就是腐蚀磨损。由此可见，材料的腐蚀磨损实质是腐蚀与摩擦两个过程共同作用的结果。

根据与材料发生作用的环境介质的不同，腐蚀磨损可分为氧化腐蚀磨损和特殊介质腐蚀磨损。氧化腐蚀磨损是材料与氧气作用而产生的，是最常见的一种磨损形式，它的损坏特征是在金属的摩擦表面沿滑动方向呈匀细磨痕。特殊介质腐蚀磨损是在摩擦过程中，零件受到酸、碱、盐介质的强烈腐蚀而造成的腐蚀磨损。

摩擦副的磨损除以上讨论的几种主要情况外，还有一些其他类型，如微动磨损、冲蚀磨损和热磨损等。微动磨损是两接触表面相对低幅振荡而引起的磨损现象，多发生在机械连接处的零件上。冲蚀磨损是指流体束冲击固体表面而造成的磨损，它包括颗粒束冲蚀、

流体冲蚀、汽蚀和电火花冲蚀(如电机上的电刷的冲蚀等)。热磨损是指在滑动摩擦中,由于摩擦区温度升高使金属组织软化,而使表面“涂沫”、转移和摩擦表面的微粒脱落。

### 1.1.3 润滑

#### 1. 润滑的基本概念

润滑就是通过润滑剂的作用,将摩擦面用润滑剂的液体层或润滑剂中的某些分子形成的表面膜将摩擦面的表面隔开或部分地隔开。润滑条件下,固体表面间的干摩擦转化为润滑剂分子间的摩擦。由于润滑剂分子间的摩擦系数比金属表面的干摩擦系数要小得多,从而达到降低摩擦、节省能耗、减小磨损、延长机械设备使用寿命的目的。

#### 2. 润滑的分类

用润滑剂来隔开摩擦表面,防止它们直接接触,就是通常所说的“机械的润滑”。根据润滑剂在摩擦表面上所形成润滑膜层的状态和性质,润滑分为流体动力润滑、边界润滑、混合润滑和弹性流体动力润滑。

##### (1) 流体动力润滑

通过轴承的转动或摩擦面在楔形间隙中的滑动而产生油压自动形成流体油膜的方式叫做流体动力润滑。流体动力润滑广泛应用于滑动轴承和高速滑动摩擦部件之中,是机械设备中应用最普遍的润滑方式。流体动力润滑的摩擦系数低,通常为 $0.001\sim 0.008$ ,是最理想的润滑。

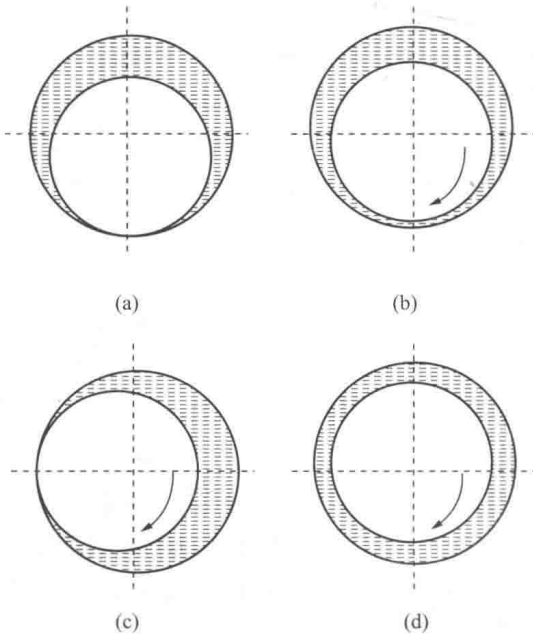


图 1-2 滑动轴承的润滑油润滑

一个完全的润滑油油膜是怎样形成的呢?现在我们用滑动轴承的润滑情况为例,来说明油膜的形成过程(见图 1-2)。

轴在转动前的状况如图 1-2 中(a)所示。轴与轴承的底部互相紧挨着,润滑油则介于轴与轴承之间的月牙形缝隙中。当轴开始转动(按箭头所示的方向)时,状况如图 1-2 中(b)所示,由于润滑油受金属表面分子吸引力的作用,在润滑油中的极性分子便会被牢固地吸附在金属表面,形成边界油膜层,随着轴表面移动,而离摩擦面较远的那些未被金属表面吸附的润滑油分子,则依靠润滑油分子之间的黏滞力,被随轴转动的边界油膜层的分子携带着卷入轴与轴承紧挨着的底部,开始将轴与轴承隔开。随着轴转速的加快,由于润滑油分子间内摩擦力的作用,而使更多的润滑油分子被裹携进入

轴承底部的狭窄的缝隙中去,在这个过程中形成了一个楔形力,如图 1-2 中(c)所示,把润滑油压入轴与轴承间的底部缝隙。这个力分解为两个分力。一个分力竖直向上,把轴向上抬起,另一个分力沿着水平方向把轴稍稍向后推移。当轴的转速逐渐增加时,轴承底部油膜的厚度也随着增大。当轴的转速达到正常值时,轴与轴承之间的整个环形缝隙中的油膜厚度就逐渐趋于均匀,轴就渐渐地移到轴承的中心并稳定在这个位置上。于是,一个完全的润滑油油膜便建立起来,如图 1-2 中(d)所示,这时,运转中的轴就像浮在“油垫”上

一样，完全被油膜托起，并被包围在环形油膜当中。

润滑油在轴与轴承中间能否形成油膜以及形成的油膜厚度如何，一方面取决于轴的工作条件(轴的转速与负荷)，另一方面也取决于润滑油的油性(即润滑油的分子在金属表面的吸附能力)和黏度。黏度、轴的转速和负荷是决定轴承能否形成流体动力润滑的三个因素。三者联系用轴承特性因数  $C$  表示：

$$C = \frac{\eta N}{P} \quad (1-2)$$

式中  $\eta$ ——润滑油的黏度， $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ；

$N$ ——轴承转速， $\text{r}/\text{min}$ ；

$P$ ——轴单位投影面积上的负荷， $\text{MPa}$ 。

经验表明， $C$  的数值较大时，该轴承一般能保持在良好的润滑状态。 $C = 500 \sim 600$  时即能保证可靠的流体动力润滑。

通常情况下，轴的转速及负荷，是由机器的机械性能所决定的。石油的润滑油产品具有一定的油性，还可以加入添加剂以改善其油性。因此，在选择使用润滑油时，需要考虑的主要问题，就是如何根据机器的机械性能来选用具有适宜黏度的润滑油。由上述分析不难看出，选择原则有以下几个方面。

①润滑油黏度随温度增加而减小，所以高温润滑部位应选择黏度大的润滑油。

②负荷较大的部位，应选择黏度大的润滑油。

③转速较快的轴承，应选择黏度小的润滑油，因为转速快容易带动润滑油产生较大的油楔力。

④接触面粗糙的机件，一般宜选用黏度大的润滑油，以便形成较厚的油膜，避免金属直接接触。

## (2) 边界润滑

流体动力润滑必须在润滑油的黏度和机械的转速、负荷、间隙等配合恰当的条件下才能实现。当负荷增大或黏度、转速较低，也就是轴承特性因数  $C$  太小时，流体动力润滑膜将要变薄，当油膜厚度小于摩擦面的凸峰的高度时，两摩擦面的较高凸峰将会直接接触，其余的地方被一到几层分子厚的油膜隔开，摩擦系数增大，此时，在摩擦面间不能形成流动油膜，但在接触面上有一层极薄的油膜，且依靠特殊的结合力与摩擦面结合在一起形成的表面膜，在一定程度上仍能起到保护表面的作用，即出现能控制住的有限摩擦，这种润滑状态称为边界润滑。形成的膜称为边界膜，边界膜的存在可以避免摩擦件之间的干摩擦，从而显著降低摩擦损耗，大大减少磨损。决定边界润滑摩擦磨损的主要是吸附在固体界面的边界膜的化学特性和摩擦面的性状，而非液体润滑中起重要作用的黏度等因素。边界润滑的摩擦系数大于流体动力润滑的，约为  $0.05 \sim 0.15$ 。边界润滑具有以下特点。

①金属透过油膜接触或黏结时是发生在一些孤立的点上。

②降低磨损的效果比降低摩擦显著。

③摩擦系数只取决于摩擦表面的性质和边界膜的结构形式，而与润滑剂的黏度无关。

边界润滑状态下，在大部分摩擦面上存在一层与介质性质不同的边界膜，这层薄膜的厚度在  $0.1 \mu\text{m}$  以下，并具有良好的润滑性能。边界膜有可能是吸附于摩擦件表面的极性物质所形成的吸附膜，也可能是由摩擦件表面和润滑油添加剂在摩擦产生的高温下形成的反应膜。边界膜的存在可以避免摩擦件之间的干摩擦，从而显著降低摩擦损耗，大大减少

磨损。

在边界润滑状态中，边界膜是由润滑剂的极性分子吸附在摩擦表面所形成的，称为吸附膜。根据添加剂的性能不同，边界膜可分为以下三种：

①物理吸附膜。它是润滑油中添加剂的分子借助于范德华力吸附在金属表面上而形成单分子层或多分子层的吸附润滑膜。

它要求添加剂分子必须是极性分子(极性基可与金属以偶极形式吸附)，同时还应有长链烃基(可与油分子凝聚，形成油层)。这种膜温度较高即脱落，只适用于较低温度，产生摩擦热较小的情况，即适用于低速、低负荷的运动机械。

②化学吸附膜。润滑油中添加剂分子具有化学结合力很强的活性键，它与金属表面分子产生化学吸附而形成的吸附膜。

适用于中等负荷、温度和速度条件下边界润滑的条件。这种膜高温即脱落。

③化学反应膜。含硫、磷、氯等元素的润滑油添加剂(极压剂)能与摩擦表面起化学反应，生成一层边界膜，叫化学反应膜。在高温条件下反应生成，比任何吸附膜都要稳定得多。适用于重载、高温、高速。

由于这些反应薄膜的熔点、抗剪强度低，又能降低单位表面的负荷，所以它们能减少金属的黏结、磨损和提高承载能力。

化学反应膜的形成条件：

- ①添加剂必须具有化学活性；
- ②金属表面必须是可反应的；
- ③表面必须有足够的能参与摩擦化学反应的组分。

### (3)混合润滑

当  $C$  小到一定程度，摩擦件之间不能形成连续的流体层，流体动力润滑膜不足以使两个表面隔开，微凸体开始接触，且是间断接触，即出现流体动力润滑和边界润滑兼而有之的情况，可称为混合润滑。

图 1-3 所示为 Stribeck 曲线，它表示处于流体动力润滑、边界润滑及混合润滑三种状态下摩擦系数与轴承特性因数  $C$  之间的关系以及上述三种润滑状态的分区。

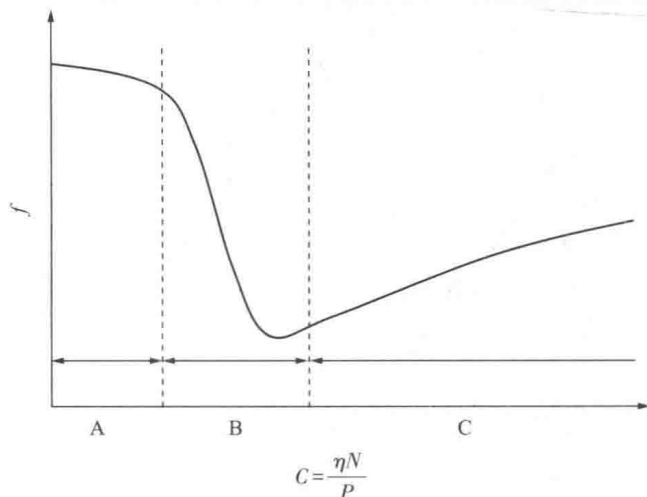


图 1-3 摩擦系数与轴承特性因数之间的关系  
A—边界润滑区；B—混合润滑区；C—流体动力润滑区

Stribeck 曲线是轴承特性因数  $C$  和摩擦系数  $f$  的关系曲线。若  $C$  值足够大时就形成了流体动力润滑。这时流体膜的厚度足以将固体表面隔开，没有微凸体的碰撞，完全为液体润滑。这个区域为流体动力润滑区。可以看出一旦形成流体动润滑之后，再增大  $C$  值，是没有好处的，因为这将使摩擦系数  $f$  加大，在运动中要增大阻力。

第二区域在图中两条虚线之间，在这个区域内随着  $C$  值的减小， $f$  值迅速地增加。这是因为当  $C$  值小到左边虚线处，开始发生微凸体间的接触。这时摩擦系数由两部分组成，一部分是固体摩擦(或有边界膜存在)的摩擦系数，一部分是液体间的摩擦系数。众所周知，前者比后者大得多。所以当  $C$  的数值减小时，固体间的接触的份额增大，摩擦系数急剧上升。

第三区域为边界润滑区。当  $C$  值小到一定程度时，微凸体发生连续的接触，这个区域称为边界润滑区。这时固体间靠金属表面吸附的极性物质润滑，其摩擦系数决定于吸附膜的性质，理论上不受  $C$  值得影响。

#### (4)弹性流体动力润滑

但在齿轮、滚动轴承等零件中，两摩擦面的几何形状差别很大，实际接触面较小，因此承受的压力也较高。如所谓“线接触”的齿轮和“点接触”的滚珠轴承，它们的接触面积仅为滑动轴承的千分之几，接触面的平均压力高于滑动轴承的上千倍。在很高的压力下，材料产生的弹性变形和使润滑油黏度增大的影响便不能忽视。在较大压力下，考虑到压力对零件弹性变形和润滑油黏度影响的润滑称之为弹性流体动力润滑。

弹性流体动力润滑常存在于滚珠、滚动轴承或齿轮传动等机件中。由于齿轮、滚动轴承等零件中，两摩擦面的几何形状差别很大，实际接触面较小，因此承受的压力也高。在很高的压力下，材料产生的弹性变形和使润滑油黏度增大，是形成弹性流体动力润滑的两个主要原因。

①弹性变形。图 1-4 表示两个圆柱体接触时的变形及压力分布示意图。其变形区叫赫兹区。赫兹区越靠中心，变形越大，承受压力越大，而越靠近边缘，承受压力越小。

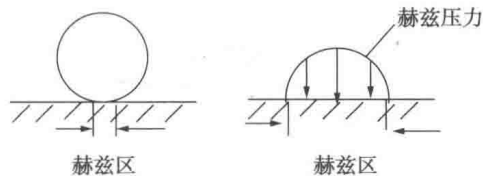


图 1-4 圆柱体接触时的变形及压力分布

#### ②润滑油黏度和压力的关系

$$\eta_p = \eta_0 e^{\alpha P} \quad (1-3)$$

式中  $\eta_p$ ——在压力下的黏度， $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ；

$\eta_0$ ——在常压下的黏度， $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ；

$P$ ——压强， $\text{kgf}/\text{cm}^2$ ；

$\alpha$ ——黏度-压力常数，压力的倒数。

$\alpha$  随油品性质不同而异。在压力为  $137.2\text{MPa}$  时，黏度可增加 10 倍，而在此压力下，润滑油稠得几乎不能流动。这样油品进入赫兹区的边缘以后，随压力增高，油的黏度增加。在高速运动中，接触时间很短，还来不及将油挤出，接触已经脱离，这就是弹性流体动力润滑膜能够建立的原因。