

“十一五”国家重点图书



高等院校化工类专业规划教材

石油产品添加剂

吕涯 / 主编

Petroleum products additives



华东理工大学出版社
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

“十一五”国家重点图书



高等院校化工类专业规划教材

石油产品添加剂

Petroleum products additives

内容提要

石油产品(主要包括燃料和润滑剂)及其添加剂的生产及应用是现代石油化工工业的一个重要组成部分。合理使用添加剂不仅可以提高石油产品的附加值,而且对于节能减排、合理利用石油资源有重要意义。

本书在介绍燃料和润滑油性质和使用性能的基础上,着重介绍燃料和润滑油的添加剂典型品种牌号的化学结构组成、作用机理和使用性能。本书通过描述主要燃料油品和润滑油品的特点、性质和规格标准,介绍了添加剂在这些石油产品中的应用情况。

本书简明实用、深入浅出,可作为高等学校油气储运工程、化学工程与工艺和机械工程等专业的选修课教材,也可供石油产品销售人员和管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

石油产品添加剂/吕涯主编. 上海:华东理工大学出版社,
2011. 10

(高等院校化工类专业规划教材)

ISBN 978-7-5628-3124-2

I. ①石... II. ①吕... III. ①石油添加剂-高等院校-
教材 IV. ①TE624.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 168031 号

“十一五”国家重点图书
高等院校化工类专业规划教材

石油产品添加剂

主 编 / 吕 涯

责任编辑 / 徐知今

封面设计 / 裘幼华

责任校对 / 李 晔

出版发行 / 华东理工大学出版社

地址:上海市梅陇路 130 号,200237

电话:(021)64250306(营销部)

传真:(021)64252707

网址:press.ecust.edu.cn

印 刷 / 常熟华顺印刷有限公司

开 本 / 710mm×1000mm 1/16

印 张 / 16.5

字 数 / 319 千字

版 次 / 2011 年 10 月第 1 版

印 次 / 2011 年 10 月第 1 次

书 号 / ISBN 978-7-5628-3124-2/TE·3

定 价 / 36.00 元

(本书如有印装质量问题,请到出版社营销部调换。)

前 言

石油是重要的能源之一,石油产品对整个国民经济影响极广。添加剂的出现和广泛使用使石油产品更加好用,这对节约能源、维护设备、提高效率都具有重要的意义。21 世纪以来,随着人们对环境保护日益重视,对燃料和润滑油添加剂的使用提出了更高要求,不仅要求添加剂本身应是环境友好的产品,而且要求通过添加剂的使用使石油产品对环境的危害减至最小。环保要求是添加剂技术发展的主要推动力。

添加剂产品的研发和应用是跨学科和实践性很强的科学技术,已逐步成为一个独立的石油化学品门类。石油产品中所用添加剂较多的还是润滑油,其次是燃料油如汽油、柴油、燃料油等。石蜡、沥青等也需要添加剂,但从数量和品种上说不是很多。

近年来,有关润滑油添加剂、燃料添加剂的专著已经出版了不少,但往往偏重于某一方面的学术理论研究,而适宜高等院校石油加工方向的大学生选修或一般工程技术人员自学的深入浅出的教学参考书却很少见。本书在介绍燃料和润滑油性质及使用性能的基础上,着重介绍燃料和润滑油的添加剂典型品种牌号的化学结构组成、作用机理和使用性能。通过描述主要燃料油品和润滑油品的特点、性质和规格标准,介绍添加剂在这些石油产品中的应用情况。本书可以针对不同层次对象的要求和业务基础,选择其中的部分内容,或适当补充有关化学、摩擦学、机械工程等方面的基础知识进行讲授。

谨向本书撰写过程中给予支持和指教的严正泽教授、徐心茹教授、华东理工大学优秀教材出版基金评审小组的专家表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,缺漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

编者

2011.8

目 录

第 1 章 润滑油的性能和评价方法	1
1.1 润滑油的黏度	1
1.1.1 黏度的定义和测量方法	1
1.1.2 黏度与温度的关系	3
1.1.3 黏度与压力的关系	5
1.2 润滑性	6
1.2.1 润滑基础原理	6
1.2.2 润滑性能试验方法	17
1.3 氧化安定性和热安定性	25
1.3.1 影响氧化过程的因素	25
1.3.2 润滑油的氧化方向和氧化产物	26
1.3.3 热安定性	28
1.3.4 抗氧化安定性测定方法	28
1.4 界面性质	30
1.4.1 界面张力和界面性质	30
1.4.2 清净分散性	33
1.4.3 防锈性和防腐蚀性	35
1.4.4 乳化和抗乳化	41
1.4.5 抗泡性能	46
1.5 其他性能指标	47
1.5.1 密度与相对密度	47
1.5.2 色度和气味	48
1.5.3 闪点、燃点和自燃点	49
1.5.4 凝点和倾点	50
1.5.5 酸值	51
1.5.6 水分	53
1.5.7 机械杂质	54

第2章 润滑油基础油	55
2.1 石油基础油的规格标准	55
2.2 石油基础油的生产	60
2.3 基础油的调合	63
2.3.1 基础油调合后黏度的计算	63
2.3.2 基础油调合后闪点的计算	64
2.4 合成润滑油	66
2.4.1 合成润滑油的分类	66
2.4.2 合成润滑油的性能特点	67
2.4.3 各类合成润滑油的品种及性能简介	67
第3章 润滑油添加剂	76
3.1 添加剂的分类和命名	77
3.2 清净分散剂	82
3.2.1 清净分散剂的品种及结构	82
3.2.2 清净分散剂的作用机理	84
3.2.3 各种清净分散剂的性能及使用	88
3.3 抗氧化剂	93
3.3.1 抗氧化剂的种类和作用机理	93
3.3.2 酚型抗氧化剂	94
3.3.3 胺型抗氧化剂	94
3.3.4 二烷基二硫代磷酸锌	95
3.3.5 金属钝化剂	97
3.3.6 其他抗氧化剂	97
3.3.7 抗氧化剂的协和作用	98
3.3.8 抗氧化剂的发展方向	100
3.4 载荷添加剂	101
3.4.1 油性剂	102
3.4.2 抗磨剂和极压剂	105
3.4.3 载荷添加剂的应用	114
3.5 增黏剂	117
3.5.1 增黏剂的作用机理	118
3.5.2 增黏剂的种类及其特点	118
3.5.3 增黏剂的使用性能及其影响因素	120
3.6 防锈剂	122
3.6.1 防锈剂的作用机理	122

3.6.2 防锈剂的种类及性能	125
3.7 降凝剂	128
3.7.1 降凝剂的作用机理	129
3.7.2 降凝剂的种类、性能及其合成方法	129
3.7.3 基础油对降凝剂效果的影响	130
3.8 乳化剂和破乳剂	131
3.8.1 乳化剂	131
3.8.2 破乳剂	135
3.9 消泡剂	136
3.9.1 消泡剂的作用机理	137
3.9.2 硅油消泡剂	138
3.9.3 聚丙烯酸酯消泡剂	139
3.10 其他添加剂	139
3.10.1 密封件膨胀剂	139
3.10.2 防霉灭菌剂	139
第4章 添加剂在润滑油中的应用	140
4.1 润滑剂的发展简史	140
4.2 润滑剂的分类	142
4.2.1 按物理状态分类	142
4.2.2 按用途分类	144
4.2.3 工业用润滑油的黏度分类	145
4.3 全损耗系统用油	146
4.4 齿轮油	149
4.4.1 齿轮油的工作特点和性能要求	149
4.4.2 齿轮油的分类	150
4.4.3 车辆齿轮油的质量指标和评定方法	152
4.4.4 工业齿轮油的质量指标	154
4.4.5 齿轮油的基础油和添加剂构成	155
4.4.6 齿轮油的选用	157
4.5 内燃机油	158
4.5.1 内燃机油的性能要求	158
4.5.2 内燃机油的分类和品种	159
4.5.3 质量规格标准和评定方法	162
4.5.4 内燃机油的牌号及选用	165
4.5.5 内燃机油的基础油和添加剂构成	169

4.6 液压油	172
4.6.1 液压油的工作特点和性能要求	172
4.6.2 液压油的分类	174
4.6.3 液压油的质量指标和评定方法	177
4.6.4 液压油的添加剂构成	179
4.6.5 液压油的选用	182
4.7 金属加工用油(液)	184
4.7.1 切削液	186
4.7.2 金属塑性加工油	188
4.8 电器用油	191
4.8.1 电绝缘油的性能要求	191
4.8.2 变压器油	193
4.8.3 电容器油	194
4.8.4 电缆油	195
4.9 防锈油	195
4.9.1 防锈油的性能和品种	195
4.9.2 防锈油的添加剂组成	197
4.9.3 防锈润滑油(脂)的选用	199
第5章 燃料添加剂	201
5.1 燃料油添加剂的分类	201
5.2 提高燃料储存性能的添加剂	203
5.2.1 油品氧化过程和抗氧化剂作用机理	203
5.2.2 汽油抗氧化剂	205
5.2.3 柴油稳定剂	206
5.2.4 影响汽柴油稳定性的其他添加剂	207
5.3 提高燃料燃烧性能的添加剂	208
5.3.1 辛烷值改进剂	208
5.3.2 十六烷值改进剂	213
5.3.3 重油燃烧促进用添加剂	217
5.4 清净剂和消烟剂	220
5.4.1 汽油清净剂的发展历史	220
5.4.2 汽油清净剂的作用机理	223
5.4.3 汽油清净剂的主要品种及其应用	223
5.4.4 汽油清净剂的评价方法	225
5.4.5 汽油清净剂的发展趋势	228

5.4.6 柴油清净剂	229
5.5 流动改进剂	230
5.5.1 应用背景	230
5.5.2 柴油降凝剂的分类	231
5.5.3 低温流动改进剂的化学类型和发展现状	231
5.5.4 柴油降凝剂的作用机理	235
5.6 喷气燃料添加剂	236
5.6.1 防冰剂	237
5.6.2 抗静电剂	238
5.6.3 抗菌剂	241
5.6.4 抗烧蚀剂	243
5.7 润滑剂	243
5.7.1 喷气燃料润滑性改进剂	244
5.7.2 柴油润滑性改进剂	245
5.7.3 汽油润滑性改进剂	250
参考文献	251

第 1 章 润滑油的性能和评价方法

润滑油在机械中主要起降低摩擦和减缓磨损的作用,以保证机械有效和长期地工作。润滑油首先起润滑作用;其次起冷却作用,润滑油能将机械摩擦时产生的热带走,保持一定的热平衡状态,控制机械在一定的温度范围内工作,防止温度不断升高而损坏零件;此外还有防护、密封和清洗作用等。防护作用是防止金属受到空气和其他化学气体的腐蚀;密封作用如内燃机油,可以防止燃烧时的气体通过气缸壁与活塞之间的间隙窜入曲轴箱中;清洗作用是在循环式润滑系统中,润滑油可将摩擦面间的一些磨屑等污物冲走,并将其携带到油池经沉淀和过滤除去。一些特殊用途的润滑油还有特定的作用,如液压油有传力作用,电气用油有绝缘作用,阻尼液有减震作用等。

对于一般润滑油要能在机械中起到上述作用,必须具有一定的质量性能才能满足机械工作的要求。这些基本的性能是:

- (1) 良好的润滑性 降低机械的摩擦和减缓机械的磨损;
- (2) 良好的流动性 保证润滑油迅速流到摩擦表面起润滑作用,并将摩擦产生的热量带走起到冷却作用;
- (3) 良好的氧化安定性 在储运和使用中润滑油与空气接触和受热时不易变质,在机械运行中能长期可靠地工作;
- (4) 无腐蚀性或极小的腐蚀性 对材料充分起到防护作用;
- (5) 与可能接触的橡胶等密封件的相容性 不应出现溶解橡胶或使橡胶产生过分膨胀或收缩的现象;
- (6) 良好的消泡性 使在循环、搅动过程中形成的空气泡容易消失,保证润滑油系统的正常工作;
- (7) 良好的抗乳化性 使油水容易分离;
- (8) 无水分、机械杂质。

1.1 润滑油的黏度

1.1.1 黏度的定义和测量方法

黏度反映了流体流动时,流体分子间的内部阻力。黏度可分为动力黏度即绝对黏度(简称黏度)、运动黏度和条件黏度。动力黏度是剪切应力和剪切速率之比。凡符合牛顿黏性定律的流体,称为牛顿型流体。牛顿流体的黏度不随剪

切速率的变化而变化。黏度随剪切速率的变化而变化的流体称为非牛顿型流体。大多数石油产品在油点温度以上时都是牛顿型流体(接近油点时例外),当有蜡析出时,润滑油变为非牛顿型流体。此外,加入增黏剂等高分子聚合物的润滑油、含沥青质多的重质燃料油(沥青质在油中呈悬浮胶体状存在)都是非牛顿型流体。

动力黏度 η 的单位在 SI 制中为 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ (帕·秒, $1\text{Pa}\cdot\text{s}=\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$), 也采用其千分之一即 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ (毫帕·秒); 而在 CGS 制中采用 P(泊, $1\text{P}=\text{dyn}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$), 泊的单位偏大, 通常取其百分之一即 cP(厘泊)来计量。

不同单位制度间动力黏度的换算关系为:

$$1\text{mPa}\cdot\text{s}=10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}=1\text{cP}=10^{-2}\text{P}$$

动力黏度用于油膜厚度、阻力、流量等方面的计算。它通常用旋转黏度计进行测量。在两个径向间隙很小的同心圆筒间充满润滑油, 其中一个圆柱体静止, 另一个转动, 测出其等速旋转时所需扭矩, 即可根据牛顿黏性定律求得液体的动力黏度值。

在润滑油的生产和使用中普遍采用运动黏度。运动黏度 ν 是动力黏度 η 与同温度下的密度 ρ 的比值, 即

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (1-1)$$

运动黏度的常用单位是 mm^2/s 或 cSt(厘斯, $1\text{cSt}=1\text{mm}^2/\text{s}$)。黏度对各种润滑油分级分类、质量鉴别和确定用途等有决定性作用。

运动黏度采用毛细管黏度计(图 1-1)按国标 GB 265 测定。该法是在恒温下测量一定量的液体以自身质量为动力, 通过一定长度和直径的毛细管所需的时间。其原理是由泊肃叶(Poiseuille)定律及公式导出的动力黏度计算公式

$$\eta = \frac{\pi g r^2 t}{8 V L} \quad (1-2)$$

式中 η ——动力黏度, $10^{-1}\text{Pa}\cdot\text{s}$;
 g ——重力加速度, cm/s^2 ;
 r ——毛细管半径, cm ;

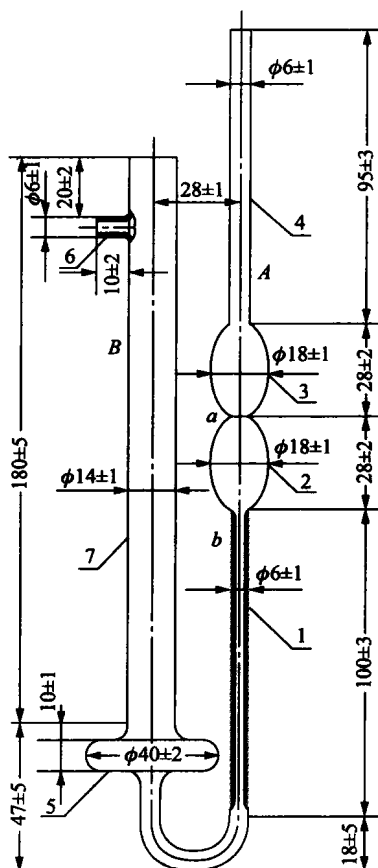


图 1-1 毛细管黏度计

1—毛细管; 2, 3, 5—扩张部分;
 4, 7—管身; 6—支管; a, b—标线

V —— t 秒间流出的液体数量, mL;

l ——毛细管的长度, cm。

考虑所测流体在同温度下的密度等因素, 则可由式(1-2)导出式(1-3)计算工业上常用的运动黏度 ν 。

$$\nu = \frac{100\pi g D^4 h t}{128 V l} - \frac{E}{t^3} \quad (1-3)$$

式中 g ——重力加速度, cm/s²;

D ——毛细管直径, cm;

l ——毛细管长度, cm;

h ——平均有效液柱高度, cm;

t ——体积 V 的液体通过毛细管长度所需的时间, s;

E ——校正系数, mm²·s。

式中, E/t^3 为运动能补正项, 如流出时间对各个黏度计规定为最小流出时间以上时, 在测定精确度上是可忽略的极小数值, 而且 $(100\pi g D^4 h / 128 V l)$ 项是每个黏度计的一定数值, 可合并为黏度计的常数 C (mm²/s²), 则式(1-3)可简化为

$$\nu = Ct \quad (1-4)$$

测量方法是先根据油的稀稠和测定时的温度, 选择适当直径的毛细管黏度计, 使液体在毛细管中的流动时间大于 200 s (详见 GB 265), 吸入油样, 放入恒温槽恒温后, 调整右面至上刻度线, 记录油面从上刻度线降到下刻度线所需的时间, 按式(1-4)计算运动黏度。毛细管常数 C 用已知黏度的标准液体流经毛细管的时间进行标定。

条件黏度是指一些工业上用特殊黏度计测定而得的相对黏度值, 如英美等国仍常用的赛氏通用黏度(SUS)。赛氏通用黏度是测量一定体积试验油在 t °C 时通过赛氏黏度计规定尺寸管子所需要的时间, 以秒数作为黏度的数值。

1.1.2 黏度与温度的关系

润滑油的黏度随着温度的升高而剧烈下降。表观黏度与温度的关系准确而常用的是瓦尔赛方程:

$$\lg \lg(\nu + 0.65) = -m \lg T + k \quad (1-5)$$

式中 ν ——运动黏度, mm²/s;

T ——绝对温度, K;

m, k ——与油品组成有关的常数, $k=0.6\sim0.8$, m 为黏度斜率, 石蜡基油 $m=3.2\sim3.5$, 环烷基油 $m=4.0\sim6.0$ 。

在对数与对数坐标系中, ν 对 T 的图像为一直线, 因而只需知道两个不同温度下的油样黏度, 即可确定式(1-5)中的两个常数, 从而求得该油品在其他温度下的运动黏度。

润滑油黏度受温度变化影响的程度就是油品的黏温特性。通常用黏度指数 VI 表示油品的黏温特性。以 40 °C 和 100 °C 的黏度为基准。用黏温性极好和极差的两种润滑油, 规定前者的黏度指数为 100, 后者为 0 (在美国前者采用宾夕法尼亚原油生产的特定标准润滑油, 后者采用海湾考斯特原油生产的特定润滑油), 前者称为 H 系油, 后者为 L 系油。

黏度指数在 0~100 内, 用式(1-6)可以计算出 40 °C 黏度为 $U(\text{mm}^2/\text{s})$ 的任何油样的黏度指数:

$$\text{VI} = \frac{L - U}{L - H} \times 100 \quad (1-6)$$

式中 L ——与所计算油品的 100 °C 黏度相同的低黏度指数标准油 (VI=0) 在 40 °C 时的运动黏度 (mm^2/s);

H ——与试验油 100 °C 运动黏度相同的 VI=100 的油的 40 °C 黏度 (mm^2/s); L 和 H 值由表 2-1 查出, 代入式(1-6), 即可求出其黏度指数。

如果试验油样 100 °C 时的运动黏度大于表 1-1 所列 100 °C 运动黏度 70 mm^2/s 时, 则应用式(1-7)和式(1-8)计算出 L 和 H 值:

$$L = 0.8353Y^2 + 14.67Y - 216 \quad (1-7)$$

$$H = 0.1684Y^2 + 11.85Y - 97 \quad (1-8)$$

式中 Y ——所求试验油样 100 °C 时的运动黏度, mm^2/s 。

例如求 40 °C 时运动黏度 73.3 mm^2/s , 100 °C 时运动黏度 8.80 mm^2/s 的润滑油的黏度指数时, 首先由表 1-1 的 100 °C 时运动黏度 8.80 mm^2/s , 查出 $L=119.94$, $H=69.48$, 代入式(1-6), 则得

$$\text{VI} = \frac{L - U}{L - H} \times 100 = \frac{119.94 - 73.3}{119.94 - 69.48} \times 100 = 92.43 \approx 92$$

黏度指数的计算资料和方法详见 GB 2541。

表 1-1 100 °C 运动黏度对应的 L 和 H 基准值

100 °C 运动黏度/ ($\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	L	H	100 °C 运动黏度/ ($\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	L	H	100 °C 运动黏度/ ($\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	L	H
2.00	7.994	6.394	8.20	104.6	61.89	19.0	449.9	212.7

续表

100℃ 运动黏度/ (mm ² · s ⁻¹)	L	H	100℃ 运动黏度/ (mm ² · s ⁻¹)	L	H	100℃ 运动黏度/ (mm ² · s ⁻¹)	L	H
2.22	9.309	7.410	8.50	111.5	65.32	20.0	493.2	229.5
2.50	11.45	9.063	8.80	119.94	69.48	21.0	538.4	241.1
2.80	13.80	10.87	9.00	123.3	71.10	22.0	585.2	264.9
3.00	15.49	12.15	9.20	128.0	73.42	23.0	663.6	283.3
3.20	17.26	13.51	9.50	135.3	76.91	24.0	683.9	301.8
3.50	20.09	15.66	9.80	142.7	80.46	25.0	736.5	320.9
3.80	23.13	17.97	10.0	147.7	82.87	26.0	790.4	340.5
4.00	25.32	19.56	10.2	152.9	85.30	27.0	847.0	360.5
4.20	27.75	21.21	10.5	160.6	88.95	28.0	904.1	380.6
4.50	31.96	23.81	10.8	168.5	92.65	29.0	963.4	401.1
4.80	36.79	26.57	11.0	173.9	95.19	30.0	1 034	421.07
5.00	40.23	28.49	11.2	176.4	97.71	31.0	1 086	443.2
5.20	43.76	30.43	11.5	187.6	101.5	32.0	1 151	464.9
5.50	49.09	33.34	11.8	196.2	105.4	33.0	1 217	487.0
5.80	54.42	36.26	12.0	201.9	108.0	34.0	1 286	509.6
6.00	57.97	38.19	12.2	207.8	110.7	35.0	1 356	532.5
6.20	61.52	40.15	12.5	216.6	114.7	38.0	1 575	603.1
6.50	67.12	43.18	12.8	225.7	118.7	40.0	1 730	651.8
6.80	73.48	46.44	13.0	231.9	121.5	45.0	2 153	780.9
7.00	78.00	48.57	14.0	263.3	135.4	50.0	2 618	919.6
7.20	82.39	50.69	15.0	296.5	149.7	55.0	3 126	1 066
7.50	88.85	53.98	16.0	331.9	164.6	60.0	3 676	1 222
7.80	95.43	57.31	17.0	369.4	182.2	65.0	4 268	1 386
8.00	100.0	59.60	18.0	408.6	196.2	70.0	4 905	1 558

5

1.1.3 黏度与压力的关系

润滑油的黏度随压力的升高而增大,当压力在 10~20 MPa 以内时,黏度增加不多,但当压力继续升高时,黏度显著增加。黏压关系最常用的表达式为

$$\eta_p = \eta_0 e^{\alpha p} \quad (1-9)$$

式中, η_p ——常压下的黏度; η_0 ——实际压力下的黏度; p ——压力; α ——黏度压力系数。

润滑油的黏度越大,其黏度压力系数越大;润滑油的组成不同,压力对黏度的影响程度也不同。石蜡基润滑油的黏度压力系数小,而环烷基润滑油的黏度压力系数较大。一般黏度随温度变化大的油,随压力变化也大,压力升高黏度指

数增大,温度升高则黏度压力系数下降。

1.2 润滑性

润滑剂的减少摩擦和磨损、防止相对运动的两摩擦表面之间的擦伤和烧结的能力统称为润滑性能。润滑油的这种性能可以使摩擦表面的摩擦系数变小,从而减小了机械的摩擦损失,提高了工作效率,同时能减缓表面的相互磨损,使机械的使用寿命延长。

1.2.1 润滑基础原理

1. 摩擦

当两个紧密接触的物体沿着它们的接触面做相对运动时,会产生一个阻碍这种运动的阻力,这种现象叫摩擦,这种阻力叫摩擦力。

把机器中互相接触和相互之间有相对运动的两个构件组成的联结称作“运动副(或摩擦副)”。任何机器的运动都是靠各种“运动副”的相对运动实现的,而相对运动必然伴随摩擦的发生。摩擦会造成不必要的能量损失,还会使机器表面发热、磨损乃至失效。因此有必要研究摩擦的规律,并设法减少因摩擦造成的危害。

1) 摩擦的分类

摩擦通常按三种方法分类。

(1) 按摩擦副的运动形式分类

① 滑动摩擦:两接触物体做相对滑动时的摩擦。

② 滚动摩擦:两接触物体沿接触表面滚动时的摩擦。

③ 自旋摩擦:物体沿垂直于接触表面的轴线做自旋运动时的摩擦(此类摩擦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预位移(如弹性和塑性变形等),但尚未发生相对运动时的摩擦。静摩擦力随作用于物体上的外力变化而变化,当外力克服最大静摩擦力时物体才开始做相对运动。在即将开始相对运动瞬间的静摩擦称为最大静摩擦,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,而把此时产生的阻碍物体运动的切向力叫动摩擦力。

(3) 按摩擦副表面的润滑状况分类

① 干摩擦:通常指两物体表面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,包括自然污染膜、润滑剂膜以及湿气等。

② 流体摩擦:即在流体润滑条件下的摩擦,此时两表面完全被液体油膜隔开,这时流体摩擦发生在界面的润滑剂膜内,摩擦阻力由流体黏性阻力或流变阻力所决定。

③ 边界摩擦:指摩擦表面存在一层极薄的润滑剂膜时的摩擦,这时摩擦不取决于润滑剂的黏度,而是取决于接触面与润滑剂的特性。

④ 混合摩擦:在摩擦副表面之间同时存在干摩擦、边界摩擦与流体摩擦混合状况下的摩擦。包括半干摩擦和半流体摩擦两种情况,半干摩擦是摩擦副表面上同时存在着边界摩擦和干摩擦的混合摩擦,半流体摩擦是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(图 1-2)。

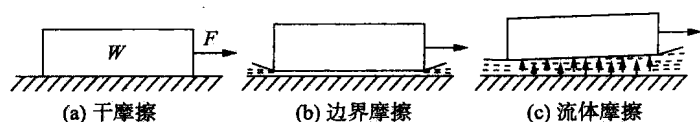


图 1-2 干摩擦、流体摩擦和边界摩擦示意图

另外在同一物体内部不同部分之间也可以发生摩擦,为了把这种摩擦与两相互接触的物体界面间发生的摩擦相区别,称为内摩擦。内摩擦一般发生在润滑剂之类的助流体内,但也可以发生在固体润滑剂的内部。

2) 产生摩擦的原因

对于接触表面做相对运动时产生摩擦力这一现象有多种解释理论,综合起来有以下几点。

(1) 机械上发生相对运动的部位虽然一般都是经过加工的光滑表面,但实际上无论加工如何精密,机械表面不可能“绝对”平滑,在显微镜下看都是高低起伏、凹凸不平的。当摩擦表面承受载荷而又紧密接触时,实际上表面是被表面凸起部分的最高峰(微凸体)支撑着形成少数支撑点的面积,因此物体之间的实际接触面与表观接触面相比是很小的。由于这些支撑点承受着很高的负荷压力,较硬表面的凸起部分就会嵌入较软的表面中并发生塑性形变和流动,使实际接触面积逐渐增加,直至可以支撑负荷压力为止。由于实际接触的支撑点附近两表面间的距离很小,处在分子引力作用范围之内,因此支撑点附近通过分子间引力会形成“黏附”点甚至形成“焊接”点,当表面间做相对运动时必须克服支撑点处的分子引力才能把这些“黏附”、“焊接”点剪断。

(2) 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使黏结力增大,因此发生相对运动时特别是高速运动时撕裂黏结点要消耗更多的动力。

(3) 由于表面上突起和陷下部分交错地联合在一起。两个接触表面做相对

运动时,表面上的突起部分就会互相碰撞和“犁削”表面,因此,只有给予足够的动力才能克服表面间相对运动的阻碍。

这些阻碍运动的阻力都是产生摩擦的原因。

2. 磨损

当摩擦副表面相对运动时,工作表面物质不断损失或产生残余变形的现象叫磨损。机械零件表面磨损后往往造成设备精度丧失,需要进行维修,由此造成停工损失,材料消耗和生产率降低。因此人们对磨损现象不断进行研究以找出影响磨损的因素和控制磨损的措施以达到减少磨损的目的。

根据磨损的破坏机理可以把磨损分为以下几种类型。

(1) 黏附磨损。这是直接相互接触的运动副表面发生摩擦过程中产生的磨损。

任何看起来很光滑的金属表面实际上仍是很粗糙的,两个表面直接靠在一起时,只有少数凸出点相接触形成支撑点,这些紧密接触的表面在分子间引力作用下会互相黏结在一起形成黏附或焊接。在滑动运动的摩擦过程中,这些联结点会被剪断,同时又产生新的联结点,在联结点被剪断时,如果剪断的位置刚好是原来的交界面就不会产生磨损,如果剪断的位置不是原来的交界面,那么金属就会从这一表面转移到另一表面,在进一步受到摩擦时,一些转移的金属会被磨下来,使金属表面出现磨损。

因此黏附磨损是直接接触的表面做相对运动时由于分子间吸引力作用而产生的黏附连接(或固相局部焊接)被破坏,致使材料由一个表面转移到另一个表面造成的磨损。

使用不易相互黏附的金属作摩擦副材料,增加润滑油油膜的厚度以及在润滑油脂中加入油性和极性添加剂,提高润滑油吸附能力和油膜强度都可使摩擦副材料抗黏附磨损的能力提高(图 1-3)。

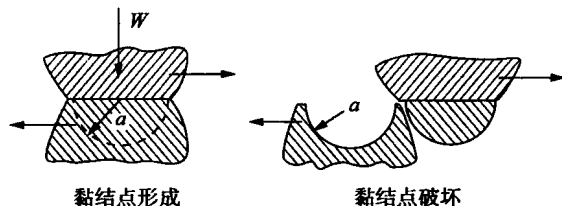


图 1-3 黏附磨损模型

(2) 磨料磨损。这是在两物体表面做相对运动时由于存在硬的物质颗粒使较软的金属表面擦伤造成的磨损。

当滑动表面之间存在第三种物质(如泥沙,矿石粉等硬质颗粒)时,就会产生磨料磨损。这种磨损称为高应力磨料磨损,常见于农业机械、工程机械中。把在