

# 润滑原理及润滑油

董浚修 编

烃加工出版社

## 内 容 提 要

本书较系统地叙述了液体动压润滑、弹性流体动压润滑、边界润滑的基础知识,以及轴承、齿轮、凸轮等摩擦副中油膜厚度的计算方法,还介绍了近年来润滑油性能研究的新发展,如润滑油流变特性对油膜厚度的影响等。关于润滑油应用方面较详细地介绍了润滑油的成分、性质、添加剂及作用机理;各种润滑油的选用原则;润滑油的掺合、用过油品的再生等。

本书初稿蒙刘广悦等同志审阅,修改稿承总后勤部油料部卢焰楷、肖汝芳、孙秀珍等同志审阅。谨此致谢。

本书可作大学四年制油品应用化学专业教学参考书。也可作从事石油炼制、油品应用、机械设计、润滑工程、机械维修等工作的科技人员的参考书。

## 润滑原理及润滑油

董 浚 修 编

\*

轻工业出版社出版

沙河建华印刷厂排版

沙河建华印刷厂印刷

\*

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本 24<sup>3</sup>/<sub>8</sub>印张 611千字 印1—5,500

1987年5月北京第1版 1987年6月北京第1次印刷

书号: 15391·75 定价: 4.50元

# 目 录

<b>第一章 摩擦和磨损</b> .....	1
第一节 摩擦.....	1
一、金属表面的性状.....	2
二、真实接触面与负荷的关系.....	6
三、摩擦机理.....	7
四、触点面积增大对摩擦系数的影响.....	8
五、表面膜对摩擦系数的影响.....	9
六、犁沟效应.....	11
第二节 磨损.....	12
一、磨损的类型及机理.....	12
二、影响磨损的因素.....	19
<b>第二章 液体动压润滑</b> .....	24
第一节 润滑油的粘度.....	25
一、粘度的定义及粘性液体的牛顿定律.....	25
二、温度对粘度的影响.....	33
三、压力对粘度的影响.....	36
第二节 轻负荷轴承的动压润滑——彼德洛夫方程.....	38
第三节 雷诺方程式.....	40
第四节 理想轴承的润滑.....	45
一、油膜内压力的分布.....	46
二、理想轴承油膜的承载能力.....	54
三、理想轴承的摩擦系数.....	59
第五节 实际轴承的液体动压润滑.....	61
一、实际轴承的摩擦系数.....	61
二、斯萃贝克曲线.....	62
三、影响最小摩擦系数的因素.....	63
四、实际轴承的最小油膜厚度.....	65
五、轴承运转时的热平衡.....	68
<b>第三章 弹性流体动压润滑</b> .....	71
第一节 负荷对零件表面及润滑油粘度的影响.....	72
一、负荷对接触面的影响.....	72
二、负荷对润滑油粘度的影响.....	73
三、弹性流体动压润滑的实验验证.....	73
第二节 弹性流体动压润滑的特征.....	76

第三节 弹性流体动压润滑的油膜厚度.....	77
一、线接触摩擦副.....	77
二、点接触摩擦副.....	84
三、滚动轴承、齿轮及凸轮的油膜厚度.....	86
四、油膜参数 $\lambda$ .....	88
第四节 弹性流体动压润滑条件下的润滑油流变特性.....	89
一、润滑油的玻璃态转变温度.....	89
二、润滑油在玻璃态转化区的粘性、弹性和塑性特征.....	93
三、润滑油的玻璃态对油膜厚度的影响.....	96
<b>第四章 边界润滑</b> .....	99
第一节 吸附膜.....	100
一、吸附膜及其作用机理.....	100
二、吸附膜强度的表示方法.....	103
三、影响吸附膜效能的因素.....	105
第二节 反应膜.....	108
第三节 作为极压添加剂用的固体润滑剂.....	109
一、石墨.....	109
二、二硫化钼.....	110
三、聚四氟乙烯 (PTFE).....	112
<b>第五章 润滑油的种类及成分</b> .....	113
第一节 润滑油的分组.....	113
第二节 矿物油.....	114
第三节 合成油.....	119
一、酯类油.....	120
二、硅油.....	125
三、硅酸酯.....	130
四、磷酸酯.....	130
五、合成烃润滑油.....	130
六、全氟碳油、氟氯碳油及氟醚油.....	132
七、烷撑聚醚.....	133
八、合成油的发展动向.....	134
第四节 润滑油的添加剂.....	136
<b>第六章 润滑油的性能</b> .....	139
第一节 润滑性能.....	139
一、典型零件及一些机械所需润滑油的工作粘度.....	140
二、润滑性能的评定.....	143
三、改进润滑油润滑性能的添加剂.....	150
第二节 润滑油的流动性.....	160
一、粘度对流动性的影响.....	160

二、凝点对流动性的影响 .....	161
第三节 润滑油的抗氧化安定性和腐蚀性 .....	167
一、润滑油的腐蚀性 .....	167
二、抗氧化安定性 .....	171
三、抗氧化剂及抗氧抗腐剂 .....	177
第四节 润滑油的抗泡性 .....	182
一、润滑油抗泡性的评定方法 .....	183
二、影响润滑油抗泡性的因素 .....	183
三、抗泡剂 .....	184
第五节 润滑油的其它性质 .....	185
一、闪点和燃点 .....	185
二、残炭 .....	187
三、灰分 .....	188
四、破乳化时间 .....	189
五、苛性钠抽出物酸化试验 .....	190
六、机械杂质 .....	190
七、水分及防锈剂 .....	191
<b>第七章 发动机润滑油</b> .....	197
第一节 发动机润滑油的工作条件 .....	197
第二节 发动机的润滑 .....	198
一、活塞环与气缸壁间的油膜厚度 .....	198
二、曲轴连杆机构轴承中的油膜厚度 .....	200
第三节 发动机中的沉积物及润滑油的清静分散性 .....	202
一、沉积物的性能及危害 .....	202
二、发动机中沉积物的来源及形成过程 .....	204
三、发动机润滑油清静性测定法 .....	205
四、发动机中影响沉积物生成的因素 .....	206
五、清静分散剂 .....	208
第四节 发动机润滑油的抗氧、抗腐蚀性 .....	219
第五节 发动机润滑油的评定及分级 .....	223
一、发动机润滑油的粘度分级 .....	223
二、发动机润滑油按使用性能分级及其评定方法 .....	224
第六节 发动机润滑油的牌号及其规格 .....	235
一、汽油机润滑油 .....	236
二、柴油机润滑油 .....	238
三、活塞式航空发动机润滑油 .....	243
四、国外相应的发动机润滑油 .....	246
五、活塞式航空发动机润滑油的互换代用 .....	251
六、中、低速柴油机润滑油 .....	251

<b>第八章 齿轮油</b> .....	259
第一节 齿轮传动装置的工作特点 .....	259
一、齿轮的类型及其工作情况 .....	259
二、齿轮传动装置的工作条件 .....	261
三、齿轮损坏的情况 .....	263
第二节 齿轮油的主要性能及其实验方法 .....	264
一、齿轮试验机 .....	265
二、润滑油粘度对齿轮磨损的影响 .....	266
三、齿轮油的极压 (EP) 性能 .....	268
四、抗氧化安定性 .....	268
第三节 工业齿轮油的种类及使用 .....	269
一、工业齿轮油的种类及牌号 .....	269
二、工业齿轮油的选用 .....	271
第四节 汽车齿轮油 .....	275
一、汽车齿轮油承载能力的评定 .....	275
二、汽车齿轮油的等级 .....	276
三、汽车齿轮油的种类及牌号 .....	277
<b>第九章 航空涡轮发动机润滑油</b> .....	283
第一节 航空涡轮发动机润滑油的工作条件 .....	283
第二节 石油基航空涡轮发动机润滑油 .....	284
一、8号喷气机润滑油 .....	285
二、石油基涡轮螺旋桨发动机润滑油 .....	288
第三节 合成航空涡轮发动机润滑油 .....	290
一、I型合成航空涡轮发动机润滑油 .....	291
二、II型合成航空润滑油 .....	296
三、国外主要的合成航空涡轮发动机润滑油 .....	301
<b>第十章 液压油</b> .....	304
第一节 液压油的性能 .....	305
一、液压油的粘温特性 .....	305
二、液压油的剪切安定性 .....	305
三、液压油的润滑性 .....	306
四、液压油与密封材料的适应性 .....	308
五、液压油的放气性 .....	309
六、液压油的清洁度 .....	310
第二节 液压油的种类及牌号 .....	311
一、我国液压油的分组 .....	312
二、国际标准化组织的液压油分级 .....	312
第三节 液压油的选择和使用注意事项 .....	324
一、液压油的选择 .....	324

二、液压油使用注意事项 .....	327
第四节 自动传动液 .....	329
<b>第十一章 其它工业润滑油 .....</b>	<b>332</b>
第一节 汽轮机油 .....	332
一、汽轮机油的工作条件和性能 .....	332
二、汽轮机油的品种、牌号及使用 .....	334
第二节 汽缸油 .....	337
√ 第三节 压缩机油 .....	338
一、活塞式压缩机油 .....	339
二、膜片式压缩机润滑油 .....	344
三、回转式压缩机油 .....	344
四、速度型压缩机润滑油 .....	347
第四节 冷冻机油 .....	347
第五节 仪表油 .....	350
一、N10号仪表油 .....	351
二、特种精密仪表油 .....	351
三、高低温仪表油 .....	352
第六节 机械油 .....	353
第七节 主轴油 .....	355
第八节 导轨油 .....	356
√ <b>第十二章 润滑油的质量管理 .....</b>	<b>358</b>
第一节 储存中润滑油质量变化情况 .....	358
一、润滑油变质的原因及储存条件对变质的影响 .....	358
二、润滑油的储存期限 .....	359
第二节 润滑油的使用指标及质量调整 .....	360
一、掺合的一般步骤 .....	361
二、掺合比例的计算 .....	361
第三节 油品的再生 .....	365
一、硫酸-白土精制 .....	366
二、几种油品的再生方法 .....	375

# 第一章 摩擦和磨损

机械的润滑是为了降低两个相对运动的接触表面（简称摩擦副）间的摩擦及磨损。良好的润滑能提高机械效率；保证机械长期可靠地工作；节约能源。润滑不良的机械，轻则功率降低，磨损增大；重则使机械损坏。从节约能源的角度来看，润滑工作的意义是很重要的。据估计，世界能源的1/3到1/2，最终以各种不同形式的摩擦消耗掉。因此，改进润滑工作，降低机械的摩擦损失，对节约能源的作用是巨大的。六十年代以后，润滑工程已成为新兴的边缘学科——摩擦学（或称摩擦磨损润滑学）——的主要内容之一。

润滑是为了降低机械的摩擦和磨损的。为了弄清楚润滑的原理，必须对机械表面的性状、摩擦和磨损的情形进行研究。

## 第一节 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(Amonton)归纳了两条有关摩擦的基本定律：

①摩擦与两物体的接触面的大小无关。

②摩擦阻力与垂直负荷成正比。

根据此定律得出摩擦力 $F$ 与负荷 $W$ 的关系：

$$F \propto W$$

$$F = fW \quad (1-1)$$

$f$ 称为摩擦系数。

1785年法国物理学家库仑(Coulomb)证实了阿蒙顿定律是正确的，并增加了第三条内容：

③在动摩擦中，摩擦阻力与滑动速度无关。

上述摩擦定律又称阿蒙顿-库仑定律。

在一定条件下，摩擦系数 $f$ 是一常数，如两块钢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，而在很干燥的空气中超过0.5。

阿蒙顿阐述的摩擦定律，是根据当时的实验结果建立的，直到现在还能在较大范围内适用。但由于当时实验技术水平的限制，不能对摩擦表面进行细致的观察，因而使他的结论①不够确切，并使对产生摩擦的原因在较长时间内得不到正确、全面的认识。

随着科学技术的不断发展，在实际工作中出现了与摩擦定律相矛盾的现象，较明显的是对于非常光滑、洁净的表面，摩擦力是与接触面积成正比的；当滑动速度较大时，摩擦阻力会下降。此外，还发现对于光滑表面，摩擦阻力随着表面的光洁度的提高而变大。这与过去解释产生摩擦阻力的说法是矛盾的。过去认为摩擦阻力是物体表面凸凹不平而引起的（凸凹说）。阿蒙顿等建立摩擦定律时，未发现这些问题，是受到当时实验技术水平的限制。实际



上摩擦阻力是与真实接触面积有关的。所谓摩擦力与接触面积无关是指的表观接触面积(或称名义接触面积、几何接触面积)。摩擦现象是产生在两个摩擦表面之间的,它与摩擦表面的相互作用有着密切的关系。因此,要正确认识摩擦定律,了解产生摩擦的真正原因,必须了解金属零件表面的性状。

## 一、 金属表面的性状

从摩擦的角度来了解金属表面的性状,主要有两方面,一是表面形貌,二是表面层结构。

### (一) 金属零件表面的形貌

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(图1-1),有如地球表面的地貌一样,布满了高山深谷。零件表面的这种凸凹不平的几何形状,称之为表面形貌。表面上凸起处称为波峰,凹下处称为波谷。相邻的波峰与波谷间的距离称为波幅 $H$ ,相邻波峰或相邻波谷间的距离称为波距(或波长) $L$ 。

金属零件的实际表面与理想光滑表面有偏差(图1-2)。根据表面的波距与波幅之比( $L/H$ )将它们分为宏观、中间及微观偏差三种。

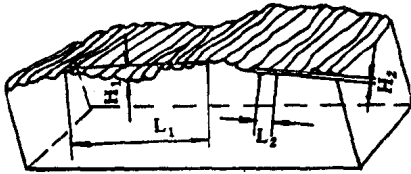


图 1-1 金属零件表面的形貌

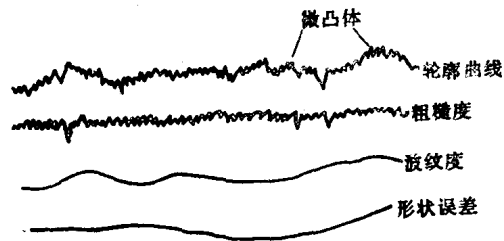


图 1-2 表面偏差示意图

①宏观偏差(或称形状误差)是不重复的或不规则的宏观变化,如凸度、凹度、锥度等。它是由于工艺设备不完善,加工方法有缺陷等而引起的。一般认为宏观偏差的 $L/H > 1000$ 。

②中间偏差或称波纹度。它是呈周期性变化的偏差,一般认为 $L/H$ 在 $50 \sim 1000$ 范围内。表面的波纹度是由于加工时机具性能的缺陷(如机床、刀具的低频振动等)引起的。

③微观偏差或称粗糙度。它是表面波纹上的微几何偏差, $L/H < 50$ 。微观偏差的每一个单独的峰叫做微凸体。粗糙度是切削工具与金属表面作用引起的。粗糙度的大小与使用的刀具和切削规范等有关。

上述金属零件表面的偏差,往往会同时出现。由于加工过程的影响因素不同,出现的表面偏差也不一样。有的是以某一种偏差为主,有的是以某两种为主。零件表面的偏差对机械的效率、耐磨性、经济性等有很大的影响,因此,希望表面偏差要小。对于形状误差及波纹度应尽量减小。对粗糙度则根据零件的用途提出不同的要求。对精密零件要求粗糙度要小。零件表面的粗糙度可用轮廓仪测出。针描法轮廓仪测粗糙度的原理是:用很细的测针垂直地触及表面,并以匀速移动。将测针随表面凸凹上下运动的轨迹放大并记录下来,即测得表面粗糙度。

表征粗糙度的特性参数比较多,根据国际标准化组织ISO/R468-66建议案,以“轮廓的平均算术偏差 $R_a$ ”、“不平度平均高度 $R_z$ ”、“不平度最大高度 $R_{max}$ ”作为考察表面粗

糙度的特征参数。

轮廓的平均算术偏差 $R_a$ 曾称为算术平均粗糙度或中线平均粗糙度 $C L A$ 。它是以前表面轮廓的波峰及波谷的中心线 $m$ 为准，多次测得波峰及波谷距中心线的距离 $Z_i$ （图1-3），取其绝对值之和 $\sum |Z_i|$ 除以测量的次数 $n$ 即得

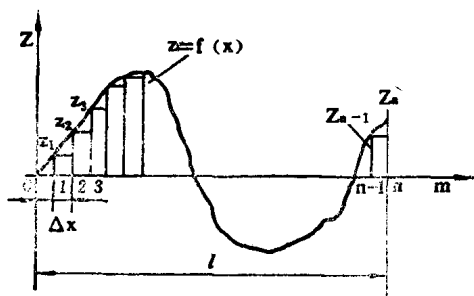


图 1-3 测量表面粗糙度示意图

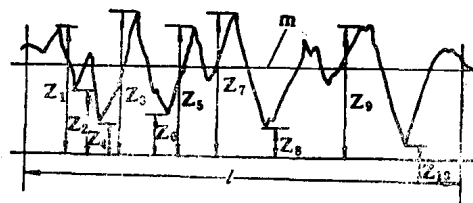


图 1-4 测十点平均高度示意图

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z_i| \quad (1-2)$$

不平度平均高度 $R_z$ 又称十点平均高度，它是被测轮廓在基本长度 $l$ 内的五个最高点和五个最低点之间的平均距离（图1-4）。

$$R_z = \frac{(Z_1 + Z_2 + \dots + Z_9) - (Z_2 + Z_4 + \dots + Z_{10})}{5} \quad (1-3)$$

不平度最大高度 $R_{max}$ 是轮廓经常出现的最高峰和经常出现的最低谷之间的距离（图1-5）

测量不平度最大高度时，个别特别高的峰可不计，因为在装配和使用中很容易磨掉，对零件的使用性能影响不大。

我国对金属零件表面加工的光洁度由国家标准分为14个等级（ $\nabla_1 \sim \nabla_{14}$ ），它是根据表面的轮廓平均算术偏差 $R_a$ 或不平度平均高度的大小划分的（表1-1）。

9级至14级每级又再细分为三级。各级的微观偏差见表1-2。

算术平均粗糙度等表征表面微观偏差的特性参数是一平均值。对于个别微凸体来说，它的高度（图1-6）可能低于或高于平均值。对摩擦、磨损、润滑有影响的主要是那些较高的微凸体。因此，在考虑表面粗糙度对摩擦、磨损、润滑的影响时，需要估计到这一情况。例如，要使油膜将两摩擦表面完全分隔开时，油膜厚度必须比两表面的算术平均粗糙度大若干倍。

此外，不同高度微凸体在表面上的分布情况对摩擦、磨损亦有影响。微凸体的高度分布是指各个同一高度水平的微凸体所占的比例。微凸体高度分布曲线的求法如下：先将表面的峰及谷的中心线标出，按固定的间隔测出峰及谷的高度 $Z_1$ 、 $Z_2$ 、 $Z_3$ ……等（图1-6）。然后，将同一水平的标高数目加起来，算出它所占的比例（频率），将各个水平标高的比例绘成高度分布矩形图。根据矩形图绘出确切的光滑曲线即得表面的高度分布曲线。

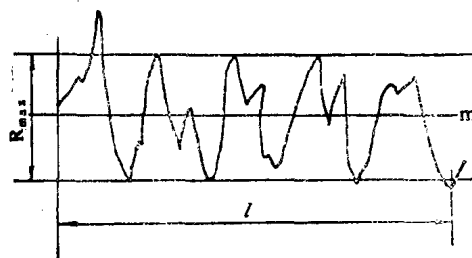


图 1-5 不平度最大高度

表 1-1

表面光洁度标准GB1031-68

表面光洁度级别	级别符号	轮廓平均算术偏差 $R_a$ $\mu\text{m}$	不平度平均高度 $R_z$ $\mu\text{m}$	基本长度 $l$ mm
1	$\nabla_1$	$>40\sim80$	$>160\sim320$	8
2	$\nabla_2$	$>20\sim40$	$>80\sim160$	
3	$\nabla_3$	$>10\sim20$	$>40\sim80$	
4	$\nabla_4$	$>5\sim10$	$>20\sim40$	2.5
5	$\nabla_5$	$>2.5\sim5$	$>10\sim20$	
6	$\nabla_6$	$>1.25\sim2.5$	$>6.3\sim10$	0.8
7	$\nabla_7$	$>0.63\sim1.25$	$>3.2\sim6.3$	
8	$\nabla_8$	$>0.32\sim0.63$	$>1.6\sim3.2$	
9	$\nabla_9$	$>0.16\sim0.32$	$>0.8\sim1.6$	0.25
10	$\nabla_{10}$	$>0.08\sim0.16$	$>0.4\sim0.8$	
11	$\nabla_{11}$	$>0.04\sim0.08$	$>0.2\sim0.4$	
12	$\nabla_{12}$	$>0.02\sim0.04$	$>0.1\sim0.2$	
13	$\nabla_{13}$	$>0.01\sim0.02$	$>0.05\sim0.1$	0.08
14	$\nabla_{14}$	$\nabla 0.01$	$\nabla 0.05$	

表 1-2

表面光洁度 9~14级细分级别

表面光洁度级别	细分级别	细分级别符号	轮廓平均算术偏差 $R_a$ $\mu\text{m}$	不平度平均高度 $R_z$ $\mu\text{m}$
9	a	$\nabla_{9a}$	$>0.25\sim0.32$	$>1.25\sim1.6$
	b	$\nabla_{9b}$	$>0.20\sim0.25$	$>1.0\sim1.25$
	c	$\nabla_{9c}$	$>0.16\sim0.20$	$>0.8\sim1.0$
10	a	$\nabla_{10a}$	$>0.125\sim0.16$	$>0.63\sim0.8$
	b	$\nabla_{10b}$	$>0.10\sim0.125$	$>0.5\sim0.63$
	c	$\nabla_{10c}$	$>0.08\sim0.1$	$>0.4\sim0.5$
11	a	$\nabla_{11a}$	$>0.063\sim0.08$	$>0.32\sim0.4$
	b	$\nabla_{11b}$	$>0.05\sim0.063$	$>0.25\sim0.32$
	c	$\nabla_{11c}$	$>0.04\sim0.05$	$>0.2\sim0.25$
12	a	$\nabla_{12a}$	$>0.032\sim0.04$	$>0.16\sim0.2$
	b	$\nabla_{12b}$	$>0.025\sim0.032$	$>0.125\sim0.16$
	c	$\nabla_{12c}$	$>0.02\sim0.025$	$>0.1\sim0.125$
13	a	$\nabla_{13a}$	$>0.016\sim0.02$	$>0.08\sim0.1$
	b	$\nabla_{13b}$	$>0.0125\sim0.016$	$>0.063\sim0.08$
	c	$\nabla_{13c}$	$>0.01\sim0.0125$	$>0.05\sim0.063$
14	a	$\nabla_{14a}$	$>0.008\sim0.01$	$>0.04\sim0.05$
	b	$\nabla_{14b}$	$>0.0063\sim0.008$	$>0.032\sim0.04$
	c	$\nabla_{14c}$	$\nabla 0.0063$	$\nabla 0.032$

大多数金属加工表面的高度分布曲线都如图1-7所示，是一种形曲线。此种分布遵从概率论的正态分布（或称高斯分布）定律，其表达式为：

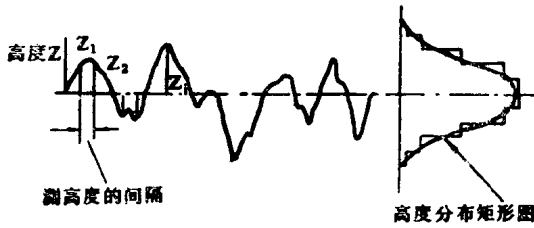


图 1-6 微凸体高度分布曲线

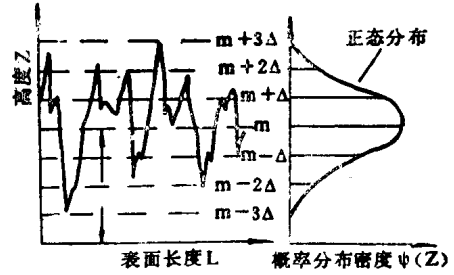


图 1-7 表面高度的正态分布

$$\Psi(Z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(Z-m)^2}{2\sigma^2}} \quad (1-4)$$

式中：  $\Psi(Z)$ ——高度等于Z的表面出现的概率密度(注意：此处的Z是表示距横坐标的高度)；

$m$ ——中线距坐标轴的距离，即高度的平均值  $= \frac{1}{n} \sum |Z_i|$ ；

$\sigma$ ——标准偏差，即均方根偏差  $= \sqrt{\frac{\sum (Z_i - m)^2}{n}}$ ；

$e$ ——自然对数底；

$\pi$ ——圆周率，此公式的意义可由图1-7表出。

从图中可看出，高度接近于平均值的表面时，其概率密度最大，即高度与平均高度相近的表面出现的机会最多，高度与平均高度相差较远的表面出现的机会较少。相差越大，出现机会越少。

## (二) 金属表面层的结构

金属加工零件的表面层是由不同物质的薄层构成的，其性质与金属零件材料的基体不同。金属零件表面一般覆盖着三、四层不同物质(图1-8)。最外面的一层是脏污物质如手汗、油污、灰尘等，其厚度约为300Å。第二层是吸附分子膜，是从周围大气中吸附来的气体、液体分子，厚3~30Å。第三层是氧化层，是金属表面与空气中的氧化合而成的，厚度为100~200Å。第四层是加工变质层又叫贝比(Bieby)层或微细结晶层，约厚10000Å，再下面就是金属的基体。

加工变质层是金属零件在加工过程中，表面层受到车削、研磨等机械加工作用而熔化、流动，最后冷却，沉聚在冷的金属基体上，形成一不定形结构或是微晶结构的硬化层。另外，有的资料还将加工变质层下面，受到机械加工影响而产生变形的部分称之为变形层。变形层下面才是未曾受到影响的基体。

为了对各种表面层有个感性认识，图1-9列出了各种表面层的厚度。

注意图中纵坐标的大小是按对数尺度划分的。这些表面层中氧化层是比较复杂的，以钢为例，它的氧化层中的氧与金属会比是从里到外(由钢材到空气)逐步增大的。

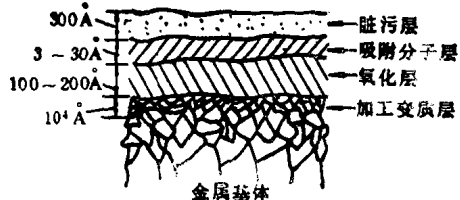


图 1-8 金属表面的构造

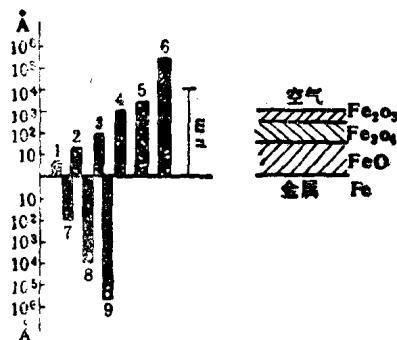


图 1-9 各种表面层厚度的比较

1—化学吸附气体；2—润滑油单分子层；3—氧化层（室温）；4—打磨表面的均方根粗糙度；5—弹性流体动力润滑油膜；6—正常油膜；7—贝比层（加工硬化层）；8—重度变形层；9—轻度变形层

从以上所述看出，金属零件的表面是不平滑的，有凸峰及凹陷。将其放大以后观察，有如高低不同的山丘、壕谷、分布在起伏的大地上。丘陵、壕谷的高低程度用粗糙度来表示，粗糙度的大小由加工方法决定，加工愈精细，粗糙度愈小。这些表面上的不同高度的微凸体，在表面上的分布密度，是服从正态分布定律的。此外，金属零件的表面是一多层结构。金属零件在加工过程中，表面的晶体发生变化，形成一硬化层。在与空气接触时形成氧化层。在表面层上吸附有气体和落在上面的尘埃，在加注润滑油的条件下，表面上还附有油膜等等。这些情况对金属零件的摩擦、磨损、润滑都有重大影响。

## 二、真实接触面与负荷的关系

古典的摩擦定律认为摩擦阻力与正压力成正比，而与接触面积无关。实际上摩擦阻力是与真实接触面有关的。如前所述，金属零件的表面是按正态分布定律（高斯定律）布满了高低不同的微凸体。两个金属表面接触时，首先接触的地方是最高的一些微凸体。最初由于接触点少，接触处的压力就比较大，接触点产生弹性变形，如果压力值超过材料的屈服强度极限，触点就会产生塑性变形，两者的效果都会使接触处的面积增大。对金属接触面与负荷的关系曾作过详细的研究，结果表明，当金属表面的微凸体是按高斯定律分布，无论是弹性变形或是塑性变形，真实接触面 $A$ 与负荷 $W$ 成正比，即：

$$A \propto W$$

实际上，大部分经过机械加工的金属表面的微凸体高度分布规律都接近于高斯定律，因之实际接触面 $A$ 与负荷 $W$ 是成正比的，即：

$$A = KW \quad (1-5)$$

真实接触面上的平均压力 $\bar{P}$ 为：

$$\bar{P} = W/A \quad (1-6)$$

由式(1-5)得知 $W/A = 1/K$ ，即 $\bar{P} = \text{常数}$ ，上两式说明，负荷增大时，两摩擦面的接触面积增大了，而平均压力不变。

另一有趣的现象是粗糙表面的平均微观接触面积亦为一常数，即：

$$A/M = \bar{A}_i = \text{常数} \quad (1-7)$$

A 为接触总面积，M 为接触点的数目， $\bar{A}_i$  为一微凸体的平均真实接触面积。上式意味着当负荷加大时，总真实接触面积 A 的增加是由于接触点的数目增多了，而不是由于每一触点的面积增大，每一触点的平均接触面积是接近不变的。

真实接触面积与表观面积之比是较小的，在钢的接触中，当  $20\text{cm}^2$  表观面积上受的负荷为 20N 时，真实接触面积与表观面积之比为 10 万分之一，加的负荷为 200N 时，为万分之一。

### 三、 摩擦机理

了解金属表面的性状和负荷与真实接触面的关系，是为了研究产生摩擦和磨损的原因以及减少摩擦和磨损的方法。现在首先讨论产生摩擦阻力的原因。

关于产生摩擦的原因，有多种说法。目前对于宏观范围的金属摩擦现象，多数人认为“粘附”理论较为合理。

“粘附”理论认为：金属表面间的摩擦首先是在接触点发生了粘结。当两表面相对运动时，必须要有足够大的切向力来剪断这些粘结点。另外，较硬的金属表面的微凸体会陷入较软的金属表面，两表面相对运动时，硬的微凸体会在软的金属面上犁出沟来。粘结和犁沟就是引起摩擦的原因，剪断粘结点和犁沟时所需的切向力就是用来克服摩擦阻力的。

两摩擦面间在一些部位之所以会发生“粘附”，是因为金属表面压在一起时，仅微凸体的尖端相互接触，由于接触处的面积很小，触点之间的应力很大，大到足以引起接触处的材料产生塑性变形。在接触处产生塑性流动时，摩擦表面的油污等薄膜和氧化层被破坏，暴露出洁净的金属表面。当洁净的两金属表面接触时，表面的原子间会形成较强的金属键结合，出现了两表面金属材料的粘附。

粘附力的存在已为实验所证实。用一洁净的钢球压在洁净的钢的表面上，二者就会粘附在一起，要用力才能拉开。压紧时用多大力，拉开时也需同样大的力。粘附力是与垂直载荷成正比，二者的比例常数约为 1。两个摩擦表面之间出现的这种粘附力的作用范围很小，约在几个  $\bar{A}$  之内。所以只有在洁净的金属表面，或是表面膜严重变形，特别是被剪应力破坏后，使金属表面的原子直接接触时，才可能出现粘附。

上述金属与金属紧密接触的表面发生的材料的粘附，有人称之为“冷焊”或“粘着”等。如果表面受到切向力的作用而发生移动时，先要剪断这些焊接起来的点才能发生相互运动。

在表面的接触点发生塑性变形的条件下（图 1-10），接触面积 A 与负荷 W 的关系为：

$$W = AP_0 \quad (1-8)$$

式中  $P_0$  为金属的屈服强度。设 S 为使焊接处剪断所需之应力，即 S 为产生塑性流动直到最后断开所需之剪应力。

那么，摩擦阻力 F 为：

$$F = AS \quad (1-9)$$

如果还考虑到硬的微凸体犁过软金属面时的阻力  $F_p$ ，则摩擦阻力应为：

$$F = AS + F_p \quad (1-10)$$

多数情况下（包括未润滑的金属面） $F_p$  比 AS 小得多，可忽略不计，故摩擦阻力为：

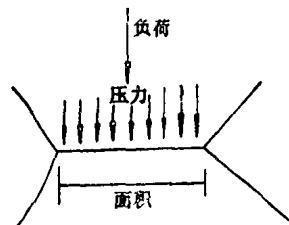


图 1-10 表面接触点产生塑性变形，面积增大到足以支持负荷

$$F = AS = \frac{W}{P_0} S \quad (1-11)$$

摩擦系数  $f$  为:  $f = F/W = S/P_0 \quad (1-12)$

粘附理论能解释以前阐述的摩擦定律, 还能进一步说明摩擦系数和金属材料性质的关系。从上述理论推出的公式(1-11)看出, 摩擦力是与负荷  $W$  成正比。这是因为摩擦力是与真实接触面成正比, 而真实接触面又与负荷成正比, 最后表现为摩擦力与负荷成正比的关系。至于古典摩擦定律中提到的摩擦力与接触面积无关一语, 应该说成是与表观接触面积无关, 而与真实接触面是有关的。

摩擦系数  $f = S/P_0$ ,  $S$  为触点发生流动时的剪应力, 如果忽略金属在加工过程中引起的硬化效应,  $S$  就等于材料的抗剪强度  $S_0$ , 这样就有:

$$f = \frac{S_0}{P_0} \quad (1-13)$$

对多数金属来说, 比值  $S_0/P_0$  是常数。这个公式说明了为什么多数金属的硬度等机械性能变化较大, 而摩擦系数仅在一小范围内变化。这个论点与观察的结果是一致的, 对大多数金属来说, 比值在 0.5~1.2 之间。

根据  $f = S_0/P_0$  的原理, 可以在硬金属上面覆盖一层软金属薄膜来降低摩擦系数。因为硬金属上敷上软金属薄膜后, 承载负荷的能力仍决定于基体, 亦即硬金属的屈服强度  $P_0$ ; 而剪切是发生在软金属层, 决定于软金属的抗剪强度  $S_0$ 。摩擦系数就为:

$$f = \frac{S_0(\text{软})}{P_0(\text{硬})} \quad (1-14)$$

例如一硬钢球在覆有铜膜的钢板上滑动, 摩擦系数能降到 0.06。

#### 四、触点面积增大对摩擦系数的影响

粘附理论能较圆满地解释金属干摩擦定律。但在定量计算方面还有较大误差。按照粘附理论, 摩擦系数仅与金属的性质有关, 其值为抗剪强度与屈服强度之比  $S_0/P_0$ , 对多数金属来说, 抗剪强度约为屈服强度的一半, 故  $S_0/P_0$  约等于 0.5。对于质量比较大的摩擦零件, 实际上摩擦面在负荷  $W$  的作用下产生塑性变形的平均屈服强度  $\bar{P}_0$  比材料的屈服强度  $P_0$  要大, 一般  $\bar{P}_0$  约为  $3P_0$ 。这是因为邻近塑性变形区周围未发生变形的材料, 对塑性变形区起了阻碍作用, 所以屈服强度变大了。这样, 摩擦系数  $f = S_0/\bar{P}_0$  就应为  $S_0/3P_0 = \frac{1}{2}P_0/3P_0 = \frac{1}{6} = 0.16$ 。也就是说, 按照粘附理论, 金属干摩擦系数应在 0.16~0.5 范围内。但实际测得的摩擦系数要大得多, 即使是负荷较小, 并处在较清洁的试验室条件下, 测得的摩擦系数通常在 1.0~2.0 之间, 而在真空条件下经仔细清洁过的金属, 干摩擦系数大于 10。

上述分歧的主要原因, 是在于设想使摩擦面开始滑动所需的切向应力  $S$  与接触面积无关。对于静止状态的两金属表面来说, 真实接触面  $A$  的大小只是受到屈服强度  $P_0$  与负荷  $W$  的影响, 这是近乎真实情况的。但发生滑动摩擦时, 情况就不是这样了, 必然要对摩擦面施加一切向力, 摩擦面才会滑动, 这时触点之间的金属材料发生屈服现象是正应力和切应力综合作用的结果。关于三维空间正应力和切应力综合作用的关系式, 尚无精确解答, 但可假设为:

$$P^2 + \alpha S^2 = K^2 \quad (1-15)$$

式中 $\alpha$ 、 $K$ 均为待定的常数。

如果接触面积为 $A$ ，则上式变为

$$\left(\frac{W}{A}\right)^2 + \alpha \left(\frac{F}{A}\right)^2 = K^2 \quad (1-16)$$

为了确定两个常数，可考虑两种极端情况。首先考虑只有正应力作用，而且接触面变大到足以支持负荷 $W$ 时，在此条件下 $S=0$ ， $P=P_0$ 由(1-15)式得：

$$P_0^2 = K^2$$

故(1-15)式变为：

$$P^2 + \alpha S^2 = P_0^2$$

其次考虑到切向力很大的情况，这时正应力可忽略不计，有：

$$\alpha S^2 \doteq P_0^2$$

当 $S$ 大到等于抗剪强度 $S_0$ 时便要产生滑动，故：

$$\alpha S_0^2 \doteq P_0^2$$

$$\alpha \doteq P_0^2 / S_0^2$$

根据实验，多数金属材料的 $\frac{P_0}{S_0}$ 之值为 $2 \sim 5$ ，故 $\alpha = 4 \sim 25$ 。

从式(1-16)及 $K=P_0$ 可看得出：

$$A^2 = \left(\frac{W}{P_0}\right)^2 + \alpha \left(\frac{F}{P_0}\right)^2 \quad (1-17)$$

$W/P_0$ 是仅有正向负荷时接触处的面积，新增加的 $\alpha \left(\frac{F}{P_0}\right)^2$ 项代表了由于切向力的作用对接触面增大的影响。

无切向力作用时，接触区域呈圆形。当施加切向力并逐渐增大所施的力时，接触面积在滑动之前，比未加切向力的要大 $3 \sim 4$ 倍，如果表面非常干净时，甚至可增大8倍。

接触面积的增大导致了摩擦阻力的增加，摩擦系数也就变大了。真空条件下金属表面很干净，受到切向力作用时，接触面积增加较大，因此，出现了摩擦系数甚至大于10的情况。

此外，零件在制造过程中，机械加工对表面的硬化效应也会增加摩擦系数。但比起触点受切向力作用面积增大的影响小得多。

### 五、表面膜对摩擦系数的影响

在真空条件下，金属表面很干净。金属表面直接接触，受到切向力作用时，接触面积增大，使摩擦阻力也增大了。当在空气中，金属表面生成氧化层，或污染了水气、油污等薄膜，两金属表面被这些薄膜隔开，不能直接接触，虽然受到切向力作用时，触点的面积也增大，但是，由于薄膜的抗剪强度比金属材料的要小很多，所以一旦切向力达到这些薄膜的抗剪强度时，两接触表面就会产生滑动。因此，金属表面覆盖有薄膜时，摩擦阻力会降低，摩擦系数较小。

现设 $S_f$ 为覆盖薄膜的抗剪强度， $S_f = CS_0$ ， $S_0$ 为金属材料的抗剪强度， $C$ 为小于1的常数，称为洁净系数。当摩擦面受切向力 $F$ 作用时，如果 $F/A < S_f$ ，触点的面积将如前所述会增大，一旦 $F/A = S_f$ 时，薄膜即被剪断，立即产生滑动。



据式(1-15), 薄膜间应力的关系为:

$$P^2 + \alpha S^2 = K^2 = P_0^2$$

当开始滑动时,  $S = S_f$ , 且从前面已知  $P_0^2 = \alpha S_0^2$  故有:

$$P^2 + \alpha S_f^2 = \alpha S_0^2$$

而  $S_f = CS_0$ , 上式变为

$$P^2 + \alpha S_0^2 C^2 = \alpha S_0^2$$

整理后得:

$$\frac{S_f}{P} = \frac{C}{[\alpha(1-C^2)]^{1/2}}$$

摩擦系数  $f = F/W = S_f A / PA$

$$f = \frac{C}{\sqrt{\alpha(1-C^2)}} \quad (1-18)$$

$f$  的函数图像见图1-11。

当  $C = S_f/S_0$  趋近于 1 时,  $f$  趋近于  $\infty$ 。这与金属表面未覆盖薄膜所得的结果是一致的。当  $C$  值由 1 下降时, 摩擦系数  $f$  迅速降低, 这意味着交界面的强度稍微减弱, 摩擦系数就急剧下降。

当  $C$  较小时,  $C^2$  可忽略不计, 方程(1-18)即变为:

$$\begin{aligned} f &= \frac{C}{\sqrt{\alpha}} = \frac{C}{P_0/S_0} \quad (\alpha = P_0/S_0) \\ &= \frac{CS_0}{P_0} = \frac{S_f}{P_0} \end{aligned} \quad (1-19)$$

亦即:

$$f = \frac{\text{交界面的抗剪强度}}{\text{金属本体的屈服强度}}$$

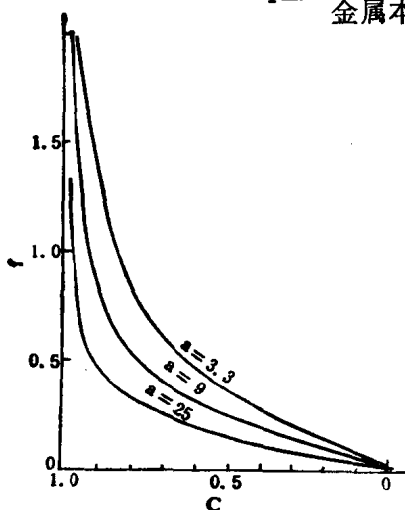


图 1-11 不同  $\alpha$  值时  $f$  与  $C$  的关系图 (除  $C$  较大时外,  $\alpha$  对  $f$  的影响不大)

此式实质上是与未考虑切向力对接触面积影响时, 在硬金属上覆盖软金属薄层求出的摩擦系数是一样的。这是可以理解的, 因为交界面的抗剪切强度微弱时, 接触面积增大不显著, 真实接触面积仅与正向负荷  $W$  及屈服强度  $P_0$  有关。

公式(1-19)所表达的摩擦系数虽然是建立在较简单的模型上, 但它能解释较大范围的摩擦现象, 具有较广的适应性。它说明了摩擦阻力是用来剪断摩擦面间的薄膜所需之力。摩擦面间薄膜的抗剪强度可由较低值变到与基体金属的抗剪强度相等。也就是说, 在空气中, 金属表面覆盖有氧化层, 只有在氧化层破裂的地方, 金属与金属才会发生焊接。

在这种情况下, 摩擦面间薄膜抗剪强度的大小, 介乎氧化膜与软金属的抗剪强度之间, 其确切值依金属的焊接程度而定。当两金属表面很干净, 无其它表面膜存在时, 交界面的抗