

潤滑原理 及 潤滑油

(第二版)

董浚修 主編



中國石化出版社

北京)
6.3
(2)

| | |
|-----|---------|
| 登录号 | 127630 |
| 分类号 | TE626.3 |
| 种次号 | 021(2) |

润滑原理及润滑油

(第二版)

董浚修 主编



石油0121936

中国石化出版社

内 容 提 要

近些年来, 润滑油品更新换代迅速, 一大批中、高档油品相继研究成功, 并逐步推广使用, 本书在原有的基础上补充了大量新的内容。

本书系统地叙述了液体动力润滑、弹性流体动力润滑、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种类、组成、性能、添加剂及作用, 各种润滑油的选用原则, 润滑油的质量管理、油品的掺合、用过油品的再生等。

本书可作为大学四年制油品应用化学专业教学参考书, 也可作为从事石油炼制、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。

图书在版编目 (CIP) 数据

润滑原理及润滑油/董浚修主编. -2 版. -北京: 中国石化出版社, 1998
ISBN 7-80043-729-9

I. 润… II. 董… III. ①机械-润滑理论②机械-润滑油-基本知识
IV. TH117.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 04517 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) 64241850

海丰印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所经销

*

787×1092 毫米 16 开本 24.5 印张 627 千字印 1—4000

1998 年 9 月第 1 版 1998 年 9 月第 1 次印刷

定价: 43.00 元

前 言

《润滑原理及润滑油》一书是将润滑理论与润滑油的应用有机结合进行论述的著作。自1987年出版以来受到广大读者的欢迎。由于在这期间润滑理论及润滑油均有很大的发展，此书是在原书基础上修订，补充了一些新的内容，以满足有关科技人员更新知识的需要。

在这十多年中，润滑理论的经典论有一些改进，并发展了一些新概念。例如在流体润滑中要考虑粘度的变化、润滑油流动的紊流、流体产生的气蚀等。特别是涉及到微观范畴的内容出现了一些新的概念。例如温诗铸等提出在弹性流体润滑与边界润滑之间尚存在数纳米到数十纳米厚的薄膜润滑。作者近十年的研究证明，润滑油抗磨剂中的非活性元素能渗透进摩擦表面，形成渗透层，起到减摩抗磨作用。

润滑油是朝着高性能、长寿命、少污染的方向发展，润滑油品种的更新换代也较过去频繁。具有代表性的是内燃机油，从80年代末的SG/CD级发展到SJ/CG-4级，并且已在酝酿开发更高级油。此外，欧洲也根据自己发动机的特点，建立了欧洲内燃机油的质量等级标准。

润滑是跨学科和实践性很强的科学和技术，它对发挥机械性能，提高产品质量及节约能源至关重要。要做好润滑工作，必须用理论知识指导实践，并通过实践不断总结提高。《润滑原理及润滑油》一书提供润滑工作中必须掌握的基本知识和润滑油应用原则。针对具体情况，应用润滑知识指导实际工作，将会对企业的增产节约产生显著作用。

本书第一版由董浚修编。第二版由其主编并撰写第四、九章，严永年编写第一、二、三章，陈国需编写第五、六章，其余部分由罗新民撰写。

由于作者水平有限，缺点、错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

董浚修

目 录

| | |
|-------------------------------------|----|
| 第一章 摩擦和磨损 | 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..... | 6 |
| 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..... | 10 |
| 七、滚动摩擦..... | 11 |
| 第二节 磨损 | 13 |
| 一、磨损的类型及机理..... | 13 |
| 二、影响磨损的因素..... | 22 |
| 第二章 液体动力润滑 | 27 |
| 第一节 润滑油的粘度 | 28 |
| 一、粘度的定义及粘性液体的牛顿定律..... | 28 |
| 二、温度对粘度的影响..... | 35 |
| 三、压力对粘度的影响..... | 37 |
| 第二节 轻负荷轴承的动力润滑——彼德洛夫方程 | 39 |
| 第三节 雷诺方程式 | 41 |
| 第四节 理想轴承的润滑 | 46 |
| 一、油膜内压力的分布..... | 46 |
| 二、理想轴承油膜的承载能力..... | 53 |
| 三、理想轴承的摩擦系数..... | 57 |
| 第五节 实际轴承的液体动力润滑 | 60 |
| 一、实际轴承的摩擦系数..... | 60 |
| 二、斯萃贝克曲线..... | 61 |
| 三、影响最小摩擦系数的因素..... | 61 |
| 四、实际轴承的最小油膜厚度..... | 63 |
| 五、轴承运转时的热平衡..... | 64 |
| 第六节 无限宽推力轴承 | 69 |
| 一、几何关系..... | 69 |
| 二、压力分布..... | 69 |
| 三、承载能力..... | 70 |
| 四、压力中心..... | 71 |
| 五、摩擦阻力..... | 72 |

| | |
|-------------------------------|------------|
| 六、流量和温升 | 73 |
| 七、侧向泄漏的修正 | 74 |
| 第三章 弹性流体动力润滑 | 75 |
| 第一节 负荷对零件表面及润滑油粘度的影响 | 76 |
| 一、负荷对接触面的影响 | 76 |
| 二、负荷对润滑油粘度的影响 | 77 |
| 三、弹性流体动力润滑的实验验证 | 78 |
| 第二节 弹性流体动力润滑的特征 | 80 |
| 第三节 弹性流体动力润滑的油膜厚度 | 81 |
| 一、线接触摩擦副 | 81 |
| 二、点接触摩擦副 | 87 |
| 三、滚动轴承、齿轮及凸轮的油膜厚度 | 89 |
| 四、油膜参数 | 91 |
| 第四节 弹性流体动力润滑条件下的润滑油流变特性 | 92 |
| 一、润滑油的玻璃态转变温度 | 92 |
| 二、润滑油在玻璃态转化区的粘性、弹性和塑性特征 | 96 |
| 三、润滑油的玻璃态对油膜厚度的影响 | 98 |
| 第四章 边界润滑 | 101 |
| 第一节 摩擦引起的金属表面效应 | 101 |
| 一、表面晶体结构缺陷 | 102 |
| 二、新鲜金属表面 | 103 |
| 三、温度的升高 | 103 |
| 四、外逸电子 | 103 |
| 第二节 吸附膜 | 104 |
| 一、吸附膜及其作用机理 | 104 |
| 二、吸附膜强度的表示方法 | 107 |
| 三、影响吸附膜效能的因素 | 109 |
| 四、温度的影响 | 110 |
| 第三节 沉积膜 | 110 |
| 第四节 反应膜 | 112 |
| 第五节 渗透层 | 113 |
| 第六节 作为极压添加剂用的固体润滑剂 | 115 |
| 一、石墨 | 116 |
| 二、二硫化钼 | 117 |
| 三、聚四氟乙烯 | 118 |
| 第五章 润滑油的种类及成分 | 119 |
| 第一节 润滑油的分组 | 119 |
| 第二节 矿物油 | 120 |
| 第三节 合成润滑油 | 125 |
| 一、合成烃 | 125 |

| | |
|------------------------|-----|
| 二、酯类油 | 129 |
| 三、硅油 | 134 |
| 四、硅酸酯 | 138 |
| 五、磷酸酯 | 139 |
| 六、全氟碳油、氟氯碳油及氟醚油 | 139 |
| 七、聚亚烷基醚 | 140 |
| 八、其它合成油 | 141 |
| 九、合成油的分子结构与特性 | 143 |
| 第四节 润滑油的添加剂 | 144 |
| 第六章 润滑油的性能 | 146 |
| 第一节 润滑性能 | 146 |
| 一、典型零件及一些机械所需润滑油的工作粘度 | 147 |
| 二、润滑性能的评定 | 149 |
| 三、改进润滑油润滑性能的添加剂 | 155 |
| 第二节 润滑油的流动性 | 166 |
| 一、粘度对流动性的影响 | 166 |
| 二、凝点对流动性的影响 | 167 |
| 第三节 润滑油的抗氧化安定性和腐蚀性 | 172 |
| 一、润滑油的腐蚀性 | 173 |
| 二、抗氧化安定性 | 176 |
| 三、抗氧化剂及抗腐剂 | 181 |
| 第四节 润滑油的抗泡性 | 186 |
| 一、润滑油抗泡性的评定方法 | 186 |
| 二、影响润滑油抗泡性的因素 | 186 |
| 三、抗泡剂种类和性质 | 187 |
| 第五节 润滑油的其它性质 | 189 |
| 一、闪点和燃点 | 189 |
| 二、残炭 | 190 |
| 三、灰分 | 191 |
| 四、破乳化时间 | 192 |
| 五、氢氧化钠抽出物酸化试验 | 193 |
| 六、机械杂质 | 193 |
| 七、水分及防锈剂 | 194 |
| 第七章 发动机润滑油 | 199 |
| 第一节 发动机润滑油的工件条件 | 199 |
| 第二节 发动机的润滑 | 200 |
| 一、活塞环与气缸壁间的油膜厚度 | 200 |
| 二、曲轴连杆机构轴承中的油膜厚度 | 202 |
| 第三节 发动机中的沉积物及润滑油的清静分散性 | 204 |
| 一、沉积物的性能及危害 | 204 |

| | |
|-----------------------------|-----|
| 二、发动机中沉积物的来源及形成过程····· | 205 |
| 三、发动机润滑油清净性测定法····· | 206 |
| 四、发动机中影响沉积物生成的因素····· | 207 |
| 五、清净剂和分散剂····· | 208 |
| 第四节 发动机润滑油的抗氧、抗腐性····· | 214 |
| 第五节 发动机润滑油的评定与分级····· | 217 |
| 一、发动机润滑油的粘度分级····· | 217 |
| 二、发动机润滑油按使用性能分级及其评定方法····· | 218 |
| 三、我国发动机油分类····· | 229 |
| 第六节 发动机润滑油的种类及牌号····· | 231 |
| 一、汽油机润滑油····· | 231 |
| 二、柴油机润滑油····· | 241 |
| 三、汽油机油和柴油机油的选用····· | 245 |
| 四、活塞式航空发动机润滑油····· | 246 |
| 五、国外相应的发动机润滑油····· | 249 |
| 六、活塞式航空发动机润滑油的互换代用····· | 252 |
| 七、中、低速柴油机润滑油····· | 253 |
| 第八章 齿轮油 ····· | 261 |
| 第一节 齿轮传动装置的工作特点····· | 261 |
| 一、齿轮的类型及其工作情况····· | 261 |
| 二、齿轮传动装置的工作条件····· | 263 |
| 三、齿轮损坏的情况····· | 265 |
| 第二节 车辆齿轮油····· | 265 |
| 一、车辆齿轮油的分类····· | 266 |
| 二、车辆齿轮油的技术指标和评定方法····· | 267 |
| 三、车辆齿轮油的种类及牌号····· | 268 |
| 四、车辆齿轮油的选用和更换····· | 271 |
| 第三节 工业齿轮油····· | 271 |
| 一、工业齿轮油的分类····· | 271 |
| 二、工业齿轮油的种类及牌号····· | 273 |
| 三、工业齿轮油的选用····· | 278 |
| 第九章 航空涡轮发动机润滑油 ····· | 281 |
| 第一节 航空涡轮发动机润滑油的工作条件····· | 281 |
| 第二节 石油基航空涡轮发动机润滑油····· | 282 |
| 一、8号喷气机润滑油····· | 282 |
| 二、石油基涡轮螺旋桨发动机润滑油····· | 285 |
| 第三节 合成航空涡轮发动机润滑油····· | 287 |
| 一、I型合成航空涡轮发动机润滑油····· | 288 |
| 二、II型合成航空润滑油····· | 291 |
| 三、国外主要的合成航空涡轮发动机润滑油····· | 292 |

| | |
|---------------------------------|-----|
| 第十章 液压油和液力传动油 | 295 |
| 第一节 液压油的性能 | 296 |
| 一、液压油的粘温特性..... | 296 |
| 二、液压油的剪切安定性..... | 296 |
| 三、液压油的润滑性..... | 297 |
| 四、液压油与密封材料的适应性..... | 298 |
| 五、液压油的放气性..... | 299 |
| 六、液压油的破乳化性和水解安定性..... | 300 |
| 七、液压油的清洁度..... | 300 |
| 第二节 液压油的分类及牌号 | 301 |
| 一、液压油的分类..... | 301 |
| 二、液压油的牌号..... | 304 |
| 第三节 液压油的选择和使用注意事项 | 314 |
| 一、液压油的选择..... | 314 |
| 二、液压油的使用注意事项..... | 317 |
| 第四节 液力传动油 | 319 |
| 一、液力传动的特点..... | 319 |
| 二、液力传动油的分类和规格..... | 320 |
| 第十一章 其它工业润滑油 | 323 |
| 第一节 汽轮机油 | 323 |
| 一、汽轮机油的工作条件和性能..... | 323 |
| 二、汽轮机油的分类、牌号与使用..... | 325 |
| 第二节 汽缸油 | 330 |
| 第三节 压缩机油、冷冻机油和真空泵油 | 331 |
| 一、压缩机油..... | 331 |
| 二、冷冻机油..... | 342 |
| 三、真空泵油..... | 346 |
| 第四节 主轴、轴承和有关离合器用油 | 347 |
| 一、主轴、轴承和有关离合器用油的分类..... | 347 |
| 二、轴承油..... | 347 |
| 三、仪表油..... | 347 |
| 第五节 全损耗系统用油 | 351 |
| 一、全损耗系统用油的分类..... | 351 |
| 二、L-AN全损耗系统用油..... | 351 |
| 第六节 导轨油 | 353 |
| 第十二章 润滑油的质量管理 | 355 |
| 第一节 储存中润滑油质量变化情况 | 355 |
| 一、润滑油变质的原因及储存条件对变质的影响..... | 355 |
| 二、润滑油的储存期限..... | 356 |
| 第二节 润滑油的使用指标及质量调整 | 357 |

| | |
|----------------------|-----|
| 一、掺合的一般步骤..... | 358 |
| 二、掺合比例的计算..... | 358 |
| 第三节 油品的再生..... | 361 |
| 一、硫酸-白土精制..... | 363 |
| 二、我国无酸精制工艺的研究现状..... | 371 |
| 三、几种油品的再生方法..... | 375 |
| 附录..... | 380 |
| 一、国际单位换算表..... | 380 |
| 二、国际单位 (SI) 的词头..... | 381 |
| 参考文献..... | 382 |

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。60 年代后，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(Da. Vinci)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：

$$\begin{aligned} F &\propto W \\ F &= fW \end{aligned} \quad (1-1)$$

式中 f 称为摩擦系数。

1785 年法国物理学家库仑 (Coulomb) 证实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，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粗糙度下降而变大。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。

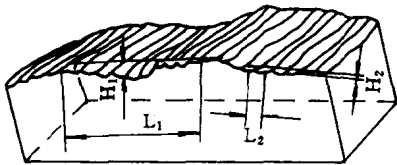


图 1-1 金属零件表面的形貌

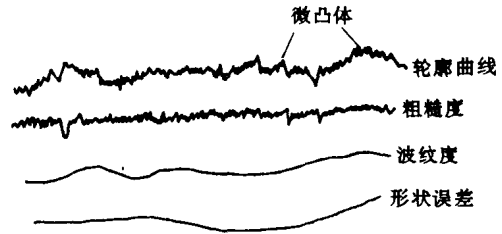


图 1-2 表面偏差示意图

(1) 宏观偏差或称形状误差。它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 50~1000 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。对粗糙度由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/R469-1982 建议案,以“轮廓的平均算术偏差 R_a ”、“微观不平度十点高度 R_z ”、“轮廓最大高度 R_y ”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 CLA 。它是以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

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

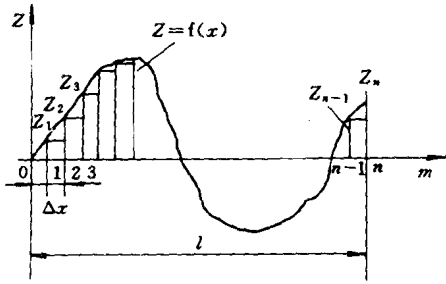


图 1-3 测量表面粗糙度示意图

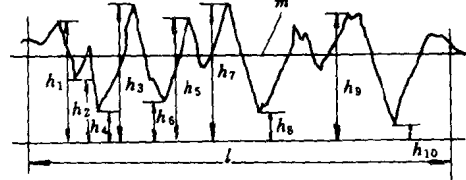


图 1-4 测微观不平度十点高度示意图

微观不平度十点高度 R_z ，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）。

$$R_z = \frac{(h_1 + h_3 + \dots + h_9) - (h_2 + h_4 + \dots + h_{10})}{5} \quad (1-3)$$

轮廓最大高度 R_y ，它是被测轮廓在基本长度 L 内轮廓峰顶线和轮廓谷底线之间的距离，见图 1-5。

轮廓最大高度 R_y 是轮廓最大峰高 Z_p 与轮廓最大谷深 Z_m 之和，因为 Z_p 与 Z_m 不一定相邻，所以 R_y 一般并不等于轮廓微观不平度高度的最大值。

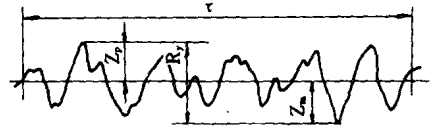


图 1-5 轮廓最大高度

在现行国家标准中，对 R_a 和 R_z 、 R_y 参数分别规定了数值系列，列于表 1-1 和表 1-2。每个参数都给出了两种系列值：第一系列和第二系列。并提出一般应优先选用第一系列。由表 1-1 和表 1-2 可见， R_a 的第一系列从 $0.012\mu\text{m}$ 到 $100\mu\text{m}$ 共分为 14 个档次， R_z 、 R_y 的第一系列从 $0.025\mu\text{m}$ 到 $1600\mu\text{m}$ 共分为 17 个档次。这两个表既是各自独立的，又不规定哪一段数值范围是几级，在应用时则直接标注某个参数的数值。

表 1-1 轮廓算术平均偏差 R_a 的数值

μm

| 第 1 系列 | 第 2 系列 | 第 1 系列 | 第 2 系列 | 第 1 系列 | 第 2 系列 | 第 1 系列 | 第 2 系列 |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0.003 | | | | | | |
| | 0.010 | | | | | | |
| | (▽14) | | | | | | |
| 0.012 | | | 0.125 | | 1.25 | 12.5 | |
| | | | | | (▽7) | | |
| | 0.016 | | 0.160 | 1.60 | | | 16.0 |
| | | | (▽10) | | | | |
| | 0.020 | 0.20 | | | 2.0 | | 20 |
| | (▽13) | | | | | | (▽3) |
| 0.025 | | | 0.25 | | 2.5 | 25 | |
| | | | | | (▽6) | | |
| | 0.032 | | 0.32 | 3.2 | | | 32 |
| | | | (▽9) | | | | |

续表

| 第 1 系列 | 第 2 系列 | 第 1 系列 | 第 2 系列 | 第 1 系列 | 第 2 系列 | 第 1 系列 | 第 2 系列 |
|--------|----------------|--------|--------------|--------------|-------------|--------|------------|
| 0.050 | 0.040 (▽12) | 0.40 | 0.50 | 6.3 | 4.0 | 50 | 40 (▽2) |
| | 0.063 | | 0.63 (▽8) | | 5.0 (▽5) | | 63 |
| 0.100 | 0.080 (▽11) | 0.80 | 1.00 | 10.0 (▽4) | 8.0 | 100 | 80 (▽1) |
| | | | | | | | |

注：表中用括号标注的▽1~▽14 上面的数值，为旧标准 GB 1031-68 规定的各个级别所对应的 R_a 参数的最大允许值。

表 1-2 微观不平度十点高度 R_z 和轮廓最大高度 R_y 的数值

μm

| 第 1 系列 | 第 2 系列 | 第 1 系列 | 第 2 系列 | 第 1 系列 | 第 2 系列 | 第 1 系列 | 第 2 系列 | 第 1 系列 | 第 2 系列 | 第 1 系列 | 第 2 系列 | |
|--------|--------|----------------|--------|---------------|---------------|-------------|--------------|--------|------------|------------|-------------|------------|
| 0.025 | 0.032 | 0.125 | 0.160 | 1.60 (▽9) | 2.0 | 25 | 32 | 400 | 125 | 1600 | 1250 | |
| | | 0.20 (▽12) | | | | | | | 2.5 | | | 20 (▽5) |
| | | 0.050 (▽14) | 0.040 | 0.25 | 0.32 | 3.2 (▽8) | 4.0 | 50 | 63 (▽7) | 80 (▽3) | 160 (▽2) | 500 |
| | | | | 0.40 (▽11) | | | | | | | 5.0 | |
| | | 0.100 (▽13) | 0.063 | 0.63 | 0.80 (▽10) | 8.0 | 10.0 (▽6) | 100 | 1000 | 500 | 800 | 1000 |
| | | | | 0.080 | | | | | | 1.00 | | 63 |

注：表中用括号标注的▽1~▽14 上面的数值，为旧标准 GB 1031-68 规定的各个级别所对应的 R_a 参数的最大允许值。

轮廓算术平均偏差 R_a 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轮廓算术平均偏差大若干倍。

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 $Z_1、Z_2、Z_3、\dots$ 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。

大多数金属加工表面的高度分布曲线都如图 1-7 所示，是一钟形曲线。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:

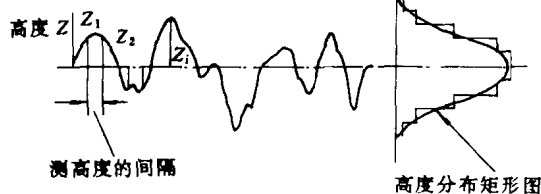


图 1-6 微凸体高度分布曲线

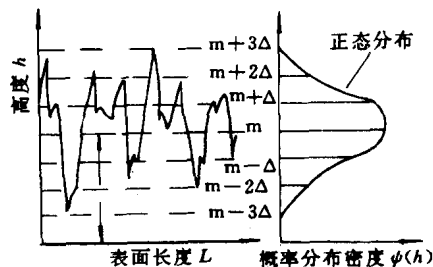


图 1-7 表面高度的正态分布

$$\psi(h) = \frac{1}{\lambda \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(h-m)^2}{2\lambda^2}} \quad (1-4)$$

式中 $\psi(h)$ ——高度等于 h 的表面出现的概率密度;

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

λ ——标准偏差,即轮廓均方根偏差 $= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - m)^2}{n}}$;

e ——自然对数底;

π ——圆周率。

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 30nm。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 0.3~3nm。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 10~20nm。第四层是加工变质层又叫贝比(Bieby)层或微细结晶层,约厚 1000nm,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。变形层面下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之比是从里到外(由钢材到空气)逐步增大的。

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。

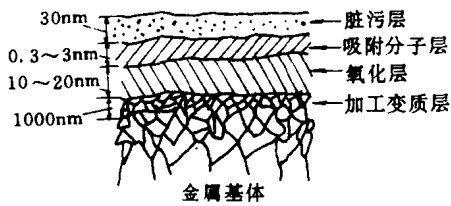


图 1-8 金属表面的构造

这些情况对金属零件的摩擦、磨损、润滑都有重大影响。

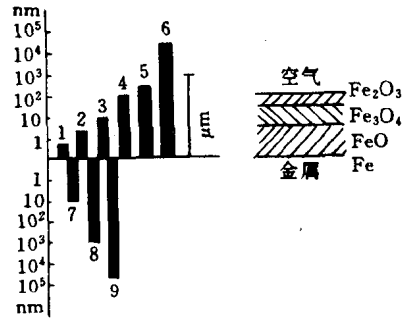


图 1-9 各种表面层厚度的比较

- 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

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正态分布，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正态分布定律，因此实际接触面 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 20cm^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十万分之一，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，一般不超过零点几纳米。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：

$$W = A\sigma_s \quad (1-8)$$

式中 σ_s 为金属的屈服强度。设 τ 为使焊接处剪断所需应力，即 τ 为产生塑性流动直到最后断开所需剪应力。

那么，摩擦阻力 F 为：

$$F = A\tau \quad (1-9)$$

如果还考虑到硬的微凸体犁过软金属面时的阻力 F_p ，则摩擦阻力为：

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

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

$$F = A\tau = \frac{W}{\sigma_s} \cdot \tau \quad (1-11)$$

摩擦系数 f 为：

$$f = F/W = \tau/\sigma_s \quad (1-12)$$

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。从上述理论推出的式(1-11)看出，摩擦力与负荷成正比。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，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 $f = \tau/\sigma_s$ ， τ 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

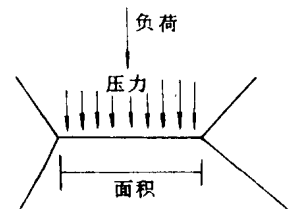


图1-10 表面接触点产生塑性变形面积增大到足以支持负荷