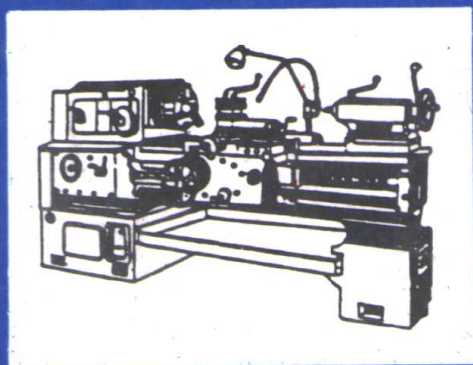




JIXIESHEBEI
YONGYOU SHOUCE

机械设备 用油手册

主 编:刘国均 副主编:张喜庭



石油工业出版社

机械设备用油手册

主 编 刘国钧

副主编 张喜庭

石 油 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本手册分为三部分:第一部分为机械设备润滑基础和常用油品,介绍了摩擦、磨损、润滑的基础知识及常用油品(包括添加剂)的性能、技术标准和选用等;第二部分为机械设备用油图表,是本手册的主要内容,包括动力设备、各种车辆、工程机械、压缩机、机械加工设备和矿场设备的用油图表;第三部分为机械设备用油管理,主要介绍了设备用油管理网络、油品的检验与更换、用油新技术的应用、废油的回收、再生和利用,最后介绍了油品安全管理常识。

读者对象为从事设备操作、维修、管理和油品管理的技术工人和工程技术人员。

图书在版编目 (CIP) 数据

机械设备用油手册/刘国钧主编.
北京:石油工业出版社,1997.4
ISBN 7-5021-2019-X

- I. 机…
- II. 刘…
- III. 机械油-手册
- IV. TE26.3-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 05614 号

石油工业出版社出版
(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)
地矿部河北测绘制印中心印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 26.25 印张 670 千字 印 1-6000
1997 年 4 月北京第 1 版 1997 年 4 月河北第 1 次印刷
ISBN 7-5021-2019-X/TE·1700
定价:50.00 元

《机械设备用油手册》编辑委员会

主任: 李虞庚

副主任: 陈泽轩 罗英俊 陈炳泉 刘国钧 张喜庭

委员: 冯健民 于世成 陈明贵 葛听根 常忠伟

池洪儒 张聪炎 裘福民 李又福 史熙嘉

彭金申 秦世伦

编写组成员

主编: 刘国钧

副主编: 张喜庭

成员 (按姓氏笔划):

马厚元 左文成 申惠民 石汝瑜 孙少华

刘承义 吴振环 何靖西 陈尊满 李书莲

张殿瑞 杜秀芳 季丽君 赵树民 魏丕文

责任编辑: 方代煊 何 莉

前 言

机械设备用油一直是工业企业，尤其是现代工业企业设备管理中的重要一环，正确地选用油品、合理润滑是保证设备安全运转和节约能源的重要措施。为此，我们编写了本手册，目的是使广大企业设备管理人员、使用操作人员和油品管理人员能进一步掌握油品知识，正确地选择油品，有效地管理油品和合理地使用油品，使设备得到良好润滑和安全运行，创造良好的经济效益和社会效益。

手册包括三部分：第一部分机械设备润滑基础和常用油品；第二部分机械设备用油图表；第三部分机械设备用油管理。设备用油图表来自于生产第一线，并经过实践检验，同时由专家审核，保证了机械设备用油图表的正确性和实用性。

本书可作设备管理、使用人员和油品管理人员工作参考读物，也可作为油品管理培训参考教材。

第一篇第一、二、四、五、六、八、十二章由胜利石油管理局吴振环、孙少华、申惠民、石汝玉编写；第一篇第三、七章由管道局陈尊满编写；第一篇第九、十、十一章由四川石油管理局左文成、罗永康、刘承义、李书莲编写；第二篇第五章由李书莲编写，第一、二、三、四、六章的文字部分由辽河石油勘探局魏丕文、赵树民、杜秀明编写，设备用油图表分别由大庆、辽河、胜利、四川、江苏、塔里木、物探局、管道局，以及有关工厂提供资料后整理；第三篇由大庆石油管理局马厚元、张殿瑞、汪国臣、蒋庆凯、魏凤林、曹蓬凯、李宗银、田润德编写，辽河石油勘探局提供了部分资料。

刘国钧、张喜庭对全稿进行了审定。方代焯做了大量的整理工作。

参加编写和审定的还有中国石油天然气总公司开发生产局彭金申，石油工业出版社陈炳泉、方代焯、何莉。

本书在编写过程中得到了有关油田、工厂和科研单位的大力支持，特致谢意！

中国石油天然气总公司开发局机电处张喜庭、彭金申、于博生对此书的发行预先做了大量工作，在此表示感谢。

由于我们水平有限，加之油品发展较快，收集资料不够全面，有关管理方面的知识介绍局限于石油企业方面的经验，很可能有片面性，不足之处，请广大读者批评指正。

编 者

目 录

第一篇 机械设备润滑基础及常用油品

第一章 绪论	1
第二章 机械设备润滑基础	4
第一节 固体的表面特性与表面接触.....	4
第二节 摩擦.....	7
第三节 磨损.....	14
第四节 润滑.....	23
第三章 石油产品的分类、指标及添加剂	28
第一节 石油产品的分类.....	28
第二节 石油产品的理化指标.....	34
第三节 石油产品的添加剂.....	41
第四章 燃料油及溶剂油	50
第一节 汽油.....	50
第二节 柴油.....	59
第三节 煤油和喷气燃料.....	66
第四节 溶剂油.....	70
第五章 内燃机油	73
第一节 内燃机油的性能.....	73
第二节 内燃机油的分类.....	74
第三节 汽油机油.....	77
第四节 柴油机油.....	90
第六章 齿轮油	97
第一节 齿轮油的性能.....	97
第二节 汽车齿轮油.....	99
第三节 工业齿轮油.....	104
第七章 液压油	112
第一节 液压油的性能.....	112
第二节 液压油的分类.....	114
第三节 常用的几种液压油.....	117
第四节 液压油的选用.....	127
第五节 制动液.....	131
第八章 压缩机油	139
第一节 压缩机油的性能.....	139

第二节	压缩机油的分类	140
第三节	往复式压缩机油	143
第四节	回转式压缩机油	145
第九章	其它油品	147
第一节	全损耗系统用油	147
第二节	汽轮机油	148
第三节	变压器油	150
第四节	冷冻机油	151
第五节	真空泵油	152
第六节	导轨油	153
第七节	主轴油	154
第八节	汽缸油	155
第九节	仪表油	156
第十节	工艺用油	157
第十一节	防锈油	160
第十章	润滑脂	161
第一节	润滑脂的性能和分类	161
第二节	润滑脂的选用	164
第三节	常用的几种润滑脂	165
第十一章	合成润滑油、脂	168
第一节	合成润滑油、脂的性能	168
第二节	合成润滑油、脂的分类	171
第三节	常用合成润滑油	172
第四节	常用合成润滑脂	175
第十二章	发动机冷却液	180
第一节	概述	180
第二节	冷却水处理剂	181
第三节	防冻液	182

第二篇 机械设备用油图表

第一章	动力设备用油	187
第一节	内燃机用油	187
第二节	发电机组用油	189
第二章	车辆用油	198
第三章	工程机械用油	235
第四章	压缩机用油	278
第五章	机械加工设备用油	285
第一节	机械加工设备用油的方式	285
第二节	金属切削机床用油	286
第三节	锻压设备用油	296

第四节 铸造设备用油(脂)	298
第六章 矿场设备用油	343
第一节 石油钻机用油	343
第二节 特车及注采设备用油	344

第三篇 机械设备用油管理

第一章 设备用油管理的目的、意义和任务	374
第一节 目的与意义	374
第二节 任务	374
第二章 设备用油管理网络及岗位职责	376
第一节 管理网络	376
第二节 管理岗位职责	377
第三章 设备用油系统工程设施	378
第四章 设备润脂管理工作的基本要求	381
第一节 油库的管理	381
第二节 润滑站(中心)的管理	381
第三节 油品“五定”润滑管理	383
第四节 油品化验室的管理	383
第五节 油品现场使用的管理	384
第六节 油品管理岗位职责及培训	384
第五章 油品的检验与更换	386
第一节 油品的检验	386
第二节 油品的更换	388
第六章 设备用油新技术	395
第一节 新油品	395
第二节 新技术、新材料	396
第七章 废油的回收、再生和利用	398
第一节 废油的回收	398
第二节 废油的再生	398
第三节 废油的利用	402
第八章 油品安全管理常识	403
第一节 油品安全管理的重要性	403
第二节 油品管理中的安全措施	403
第三节 常用油品着火扑救方法及灭火器材	407

参考文献	410
-------------------	-----

第一篇 机械设备润滑基础及常用油品

第一章 绪 论

机械设备是现代社会各个领域的重要物质装备，尤其是现代化工业、农业、科技、交通运输等各行业生产要素的重要组成部分，是军事装备的重要组成部分，甚至个人家庭生活中也离不开机械设备，因而正确选用机械设备需用的油品显得尤为重要。

动力机械合理选用燃料油，使油料充分燃烧，减少排气污染，减少积炭，避免爆震，充分发挥设备的动力；动力机械和其它机械设备，正确选用润滑剂，可以降低摩擦阻力，减少机件磨损，节省能源，发挥机械设备效率，取得较好的经济效益和社会效益。军事装备合理选用油品，以保证装备的安全性和可靠性。

机械设备合理使用油品有着极大的经济效益和社会效益，因此，国家采取了一系列政策和法规，以节省能源，如淘汰超能耗的老旧汽车，颁布了《合理润滑技术通则》(GB 13608—92) 以及其它法规，以便加强机械设备的合理润滑和科学管理，充分发挥机械设备的效能，谋求机械设备的最佳经济效益。

一、机械设备与油品的相互关系

随着社会历史的发展和科学技术的不断进步，机械设备与石油的关系愈加密切。早在二千多年前，人们就开始利用石油作为减摩剂，但是，在很长一段历史时期内，石油一直是以其自然形态而被利用。直到 18 世纪后期，人们从石油中提炼出煤油，世界上第一盏煤油灯的问世，使石油的应用产生了一个飞跃，然而其它成分却被废弃。19 世纪末，内燃发动机和汽车开始出现，20 世纪初，开始了大量生产，并不断地改进。随后飞机、船舶、舰艇、装甲车等相继出现和发展，石油在人类生产和生活中的地位日益提高。此后石油在世界范围内的开采量越来越大。特别是第二次世界大战后，美国和西欧等一些国家随着内燃机技术和汽车工业的不断发展以及其它工业的发展，从而对石油的需要量大幅度上升，并且要求增加石油产品的种类和改善产品的质量性能。所以说，石油产品种类的增加和质量性能的改善，总是伴随着工业的发展、机械设备种类的增加、性能的改进而在发生变化。进而也促进了炼油化工技术的不断进步和深化，从石油中提炼出各种液体燃料作为内燃动力设备的燃料用油，并从石油中得到各种润滑油馏分，通过进一步加工，得到各种润滑油剂，以满足不同性能特点的机械设备的润滑要求。

随着动力设备的工作性能、特点的变化，燃料油的品种不断增多，质量不断得到提高。由于内燃机出现汽油机和柴油机，燃料也就分为汽油和柴油两大类；燃气轮机的出现，又生产出喷气燃料油。汽油机又由于压缩比不等，相应出现不同牌号（不同辛烷值）品种的汽油；柴油机有低速和高速之分，并由于使用环境温度的影响，从而研制生产了不同种类、不同牌号

的柴油，以满足柴油机对燃料油的要求。随着科技进步，高速公路网络的出现，内燃机制造业的不断发展，燃油质量性能的提高较为迟缓，暴露出甚多的使用质量问题，因此，不能仅仅依靠石油加工的进步来提高产品质量，为此，多年来，国内外对燃料油的使用质量方面给予了足够的重视，并注重研究添加剂来解决燃料油使用质量问题，如抗爆剂（无铅型 MTBE 和 MMA）、抗表面引燃剂、汽化器清净剂、抗沉积剂、防冰剂、抗静电剂、抗菌剂、分散剂、低温流动改进剂、引燃改进和消烟等添加剂。另外，为了维护产品原有质量，还生产了有关保护性添加剂，如抗氧化、金属钝化稳定、抗腐蚀和防锈等添加剂。近年来，我国在各类燃料油品方面有很大的进展，能够生产众多品种和不同牌号、符合各种使用性能的燃料油品，以满足我国各型内燃设备、国外进口设备以及特种内燃装备的需要。

润滑油剂的种类、牌号很多，较为复杂。19 世纪末到 20 世纪 30 年代，内燃机制造业并不十分发达，发动机功率较低，压缩比低，对润滑油性能质量要求不高，汽油机采用相当于 SA 级、柴油机采用相当于 CA 级等质量等级最低的内燃机润滑油。在 40 年代后，内燃机功率和技术水平有所提高，在使用性能方面，出现了润滑油温度有所上升、氧化安定性不好、沉积物增多、轴承腐蚀以及机件擦伤等问题，相应研制出了 SB 级汽油机油和 CB 级柴油机油，质量水平提高了一步。50 年代至 60 年代末，美国和西欧等一些国家的车辆急剧增加，城市交通堵塞时有发生，造成汽车经常处于停停开开状态，引起发动机曲轴箱等低温区产生油泥过多，堵塞油路，以及柴油机使用较高硫含量的燃料，造成活塞积炭增多和缸套腐蚀磨损问题，同时还提出了延长油品的换油周期，因而对内燃机油又提出了新的质量要求，经过努力，又逐步研制生产了 SC、SD 级汽油机油和 CC、CD 级柴油机油。为了适应高低温使用性能，还生产了多级内燃机油，如 10W/30 等牌号。

从 70 年代特别是 80 年代至今，在世界范围内，汽车工业及内燃机制造业发展非常迅速，对内燃机油使用性能提出了更高的要求，使内燃机油的质量不断改善和提高，也加速了内燃机油质量的更新换代，尤其是汽油机油质量更新换代十分活跃，研制生产了 SE、SF、SG 级油。1987 年初美国发展了 CE 级柴油机油新规格，打破了原 CD 级柴油机油统治 22 年的历史，近年来，又研制出了更高级的 CF 级柴油机油。由于混合车队的出现（汽油车和柴油车），还生产了通用型内燃机油，如 SF/CD 级等，该油既能适用汽油机对 SF 级内燃机油的要求，又能满足柴油机对 CD 级内燃机油的需要等。从内燃机油宏观发展看，随着使用工况的日趋苛刻，它的质量将不断提高，并趋向使用低粘油、多级油、通用型内燃机油。

随着现代工业的飞速发展，机械设备的种类越来越多，结构更加复杂，使用工况日趋苛刻、恶劣，为了进一步适应现代机械设备对石油产品的需要，通过多种炼油化学加工工艺以及研制了多种化学品添加剂，如清净分散剂、粘度指数改进剂、抗氧化剂、抗腐防锈剂、极压抗磨剂、抗剪切剂、降凝剂、抗泡剂等，使石油产品的品种和牌号越来越多，质量性能得到不断改善和提高，除各种燃料油和内燃机油外，还生产了适应各种齿轮传动的不同类型、不同牌号的齿轮油和适应各种液压传动的不同种类和牌号的液压油，以及其它的机械设备所需要的全损耗系统用油、汽轮机油、压缩机油、电器用油、工艺用油、仪表用油和各种润滑脂，以及各种合成油脂等，发展到目前约有上千种石油产品以满足机械设备使用油品的要求。

我国中高档石油产品发展起步较晚，自 70 年代后期开始，加快了石油产品的科学研究和生产的发展步伐。随着改革开放，引进了国外大量的先进技术装备，促进了我国石油化学工业的高速发展，1994 年我国石油产品的生产加工能力已达 1×10^8 t 以上，年产各类燃料油品约 5000×10^4 t、各类润滑材料约 240×10^4 t 及其它一些特殊油品和化工产品，其中有的中、高档

石油产品种类及质量水平已达到国际 90 年初水平,基本可以满足我国国产设备和国外进口设备的用油需要。

二、机械设备的合理用油与经济效益

据科学家测算,世界总能源中约二分之一消耗在摩擦、磨损上,大约有 80%零件的损坏是由于摩擦、磨损引起的。因而,机械设备的合理用油,可减少机械设备的摩擦、磨损,对国民经济的发展、对延长机械设备的使用寿命具有重要的意义。在世界发达的工业国,对机械设备的合理用油都给予高度重视,如英国由于搞好了机械设备的摩擦与润滑,改进了润滑剂和机械摩擦润滑设计,改善了润滑维护操作规程及管理制度,能够使机械设备合理正确地使用油品,提高了机械设备的效率,延长了运转周期及使用寿命,据 1974 年的调查测算,英国每年可取得 87230 万英镑(当时币值)的可观经济效益。美国的主要工业部门也是如此,由于搞好了机械设备的用油及摩擦学的应用工作,据 1977 年统计测算每年将可挖掘 760 亿美元经济效益的潜力。日本是一缺少能源的国家,因此特别重视机械设备的合理用油,据 1979 年的统计,由于搞好全国机械润滑技术管理而获得的经济效益达 8200 亿日元,占日本当年国民生产总值的 3%以上。我国能源产量和耗量均列世界第三位,但单位产值能耗和润滑油耗量均为世界第一。据 1989 年公布的资料分析,我国每 1000 美元总产值消耗一次能源(折合石油)为日本的 5.56 倍,电力为日本的 2.77 倍,润滑油耗量为日本的 3.79 倍。这充分说明我国在机械设备的合理用油工作方面还存在很大的差距,同时也可看出有着巨大的经济效益潜力。

在石油系统普遍开展了现代设备的“五定”润滑管理工作,建立了一批润滑站、软化水站,改造油库,实行定期化验、按质换油,积极推广应用新技术,采用中高档新型润滑材料等工作,使机械设备的使用寿命逐年提高,节约大量的能源,如 Z12V190 大马力柴油机,通过提高产品质量、科学管理、合理润滑,大修期平均达到 15000h;胜利油田进口的 215 台日本五十铃卡车(TD72 型)已平均行驶 120×10^4 km 之多,平均三保周期达 45×10^4 km 以上。据不完全统计,仅大庆、胜利、辽河三个油田,由于初步搞好了设备润滑工作,每年为国家节约约 2.5 亿元。可见,油品在机械设备中具有多么重要的意义。

第二章 机械设备润滑基础

第一节 固体的表面特性与表面接触

一、固体的表面特性

1. 固体表面的几何形状

经过精密加工的零件表面看起来光滑平整，但在显微镜下仔细观察时，却好象在大地上布满了峡谷与高山，不论采用哪种加工技术，由于加工过程中的刀痕、切屑分离时的塑性变形以及机床、刀具、工件系统的振动等原因，加工的几何表面总存在着一定的几何误差（即使最精密的加工表面，其凹凸高度仍在 10^{-4}mm 上下），这种因加工而产生的形状误差，可分为宏观几何形状误差、中间几何形状误差和微观几何形状误差三种。

1) 宏观几何形状误差

即表面形状误差，如不直度、不平度等，是在制造过程中形成的表面几何形状对标准形状的误差，一般是有规则的，不重复出现，如图 1—2—1 中的曲线 3。

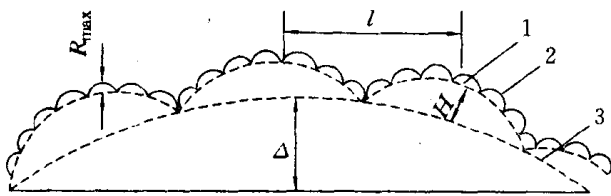


图 1—2—1 固体表面微观几何特性

1—表面波度；2—表面粗糙度；3—表面形状宏观误差；

l —基本长度； H —波纹高度； Δ —形状误差；

R_{\max} —微观不平度最大高度

2) 中间几何形状误差

即表面波度或表面加工纹理，是在制造过程中，由于机床和刀具性能不完善，如机床、刀具、工件系统的刚度不足及振动、齿轮误差、旋转刀具不准确等所形成的表面周期性的有规则并重复出现的几何形状误差，如图 1—2—1 中的曲线 1。

3) 微观几何形状误差

即表面粗糙度，是指零件加工表面上所具有的较小间距和微小峰谷的微观几何形状的不平度，其波距较小，波峰高度也小，如图 1—2—1 中的曲线 2。

表面微观几何形状误差的大小及其结构形状对机器零件的使用性能有很大的影响，表面越粗糙，实际有效接触面积越小，则单位面积压力越大，因而容易磨损。但表面过于光滑，会增加零件接触表面之间的分子吸引力，也会使摩擦系数增大（如量块），增加磨损。此外，表面微观不平度的条纹（加工痕迹）方向对摩擦也有重要影响，当摩擦表面运动方向与加工痕迹方向重合时，摩擦阻力最大，而当它们之间成一定角度或条纹无规则时，摩擦阻力最小。

2. 吸附膜和反应膜

由于固体表面具有一定的表面张力，而且在加工过程中形成的许多晶格缺陷使表面的原子处于不饱和或不稳定状态，空气中的 O_2 、 N_2 、 CO_2 等气体的自由分子运动对金属表面的撞击以及润滑油的极性基团等都容易产生吸附，从而使金属表面形成各种膜。根据膜的结构性质不同，膜可以分为吸附膜和反应膜两种。吸附膜又有物理吸附膜和化学吸附膜之分，而反应膜又可分为化学反应膜和氧化膜。

1) 吸附膜

(1) 物理吸附膜。当气体或液体与固体表面接触时，由于原子或分子相互吸引的作用力而产生的吸附叫物理吸附，所形成的膜称物理吸附膜。这种吸附膜有抵抗微凸体将膜穿透的能力，从而有效地防止摩擦表面间的接触，当摩擦副相对运动时，表面的吸附膜如两个毛刷子相互滑动，可以降低摩擦。

物理吸附膜对温度比较敏感，由于热能引起膜的解吸、位向消失或膜的熔化，因此只限于摩擦生热较低的工况下，也就是用于低负荷与低滑动速度下，其吸附与解吸完全可逆。

(2) 化学吸附膜。当润滑剂等的极性分子通过化学键的作用而吸附在固体表面上时，发生化学吸附所形成的膜称化学吸附膜，化学吸附膜比物理吸附膜稳定得多，是不完全可逆的，具有较高的吸附热。

化学吸附膜可以在其熔点以下保持有效地润滑，一般可在中等的负荷、温度与滑动速度下起润滑作用，但在高温及苛刻工况条件下，化学吸附膜会由于位向消失、变软或熔化而失效。

2) 反应膜

(1) 化学反应膜。润滑油中的某些分子，如 S、P、Cl 等会与金属表面发生化学反应，二者之间的价电子相互交换，形成一种新的化合物膜层叫做化学反应膜。它比物理吸附膜和化学吸附膜稳定得多，其特点是活性高，结合能力强，而且不可逆。S、P、Cl 等与表面形成的金属盐薄膜熔点高、剪切强度低，具有良好的润滑性能。

化学反应膜适用于重载、高速和高温的工作条件，但由于 S、P、Cl 等元素具有一定腐蚀性，因此限于表面产生反应，最适宜极压的工况条件。

(2) 氧化膜。表面氧化膜具有化学反应的性质，除金以外，氧对所有的金属都能形成化学反应，因此，经过加工的洁净的金属表面会很快地与大气中的氧起化学作用而氧化生成金属氧化膜。

氧化膜能防止表面金属间的直接接触，这是指薄的氧化膜而言，其强度较高，有利于阻止表面间发生粘着，但随着氧化膜厚度的增大，膜的强度降低，在摩擦中容易脱落成为摩擦表面间的磨粒，加剧表面间的磨损。

3. 金属的表层结构

影响物体的摩擦性能除表面形貌外，固体表面的物理化学性质是一个十分重要的因素，图 1—2—2 是金属表层的一般结构，其中自然污染层由润滑剂膜、灰尘及磨屑等脏污物质组成；吸附气体层是由于金属表面层原子所形成的力场吸附住空气、水分和各种有机物质的分子而产生的，并且吸附到表面上的活性物质能向零件表面的裂纹

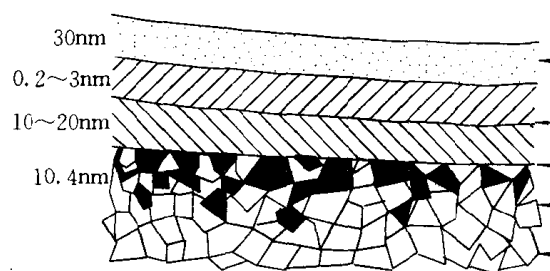


图 1—2—2 金属表层结构

渗透形成压力，使裂纹向深处扩展，导致零件表面强度下降；氧化物层则是由大气中氧与金属表面接触氧化而产生的，在常温下往往在几秒钟内就会形成 $1\sim 10\mu\text{m}$ 的氧化层，高温时氧化更快；毕氏层是在金属切削过程中由于材料的熔融和塑性流动而形成的薄层，其厚度主要取决于零件表面的载荷和相对滑动速度，载荷大时厚，速度高时薄，它具有细微的晶体结构，并比金属基体硬，耐磨性也高；变形层又称加工硬化层，是指由于切削加工使材料塑性变形而形成的硬化层，精加工时其厚度达几十微米，粗加工时可达几百微米，并且由于硬化而具

有较高的硬度。

此外，所谓“纯净表面”意味着在表面上已去掉了所有污染物，如灰尘、磨屑、微量润滑油剂（包括氧化层等化学膜），并且必须保持在超高真空状况下两个表面由于相互附着以避免重新污染，这一点很难做到，因此，通常将纯净表面看成是用溶剂将表面上的油（脂）、灰尘等清洗干净，却仍然保持有氧化膜存在的表面，这时两表面间的污染可以忽略。

二、固体的表面接触

1. 表面接触时的相互作用

当两个粗糙的固体表面在法向载荷作用下相互接触时，最先进入接触的是两表面较高的微凸体，随着载荷的增大，已接触部位变形的增加，其它微凸体也会逐步成对地进入接触，但那些两表面微凸体高度之和小于平均值的部位，即使在大载荷时也不发生接触。

微凸体进入接触时，开始是弹性变形，但当载荷增大并超过某一临界值时会发生塑性变形，因为此时材料的基体是弹性的接触，如果载荷进一步增大，表面上接触凸起的数目越来越多，两表面的实际接触面积增大，如果相互接触的两个固体表面硬度不同，则硬度高的表面凸起就会压入较软的表面，而较软表面的凸起被压扁并改变形状，这时影响表面接触特性的是硬表面上的微观几何尺寸及形状和较软表面材料的机械性能。

当两接触表面相对滑动时，开始是跑合过程，接触点不断变化，微观几何形状也在不断变化，得到某个不变的粗糙度，并且接触时除发生弹性变形外，一般都有塑性变形发生，从而导致表面层材料的物理机械性能改变，而在稳定磨损阶段，虽表面微观几何形状变化，但此时由于主要是表面微凸体的弹性变形，因而表面性质没有很大变化。

2. 表面接触面积

固体表面不可能是理想的光滑表面，存在着宏观和微观偏差，因此，当两个表面接触时，其接触具有不连续性和不均匀性，实际的接触只发生在表面局部区域里，根据这一情况，通常采用三种不同的接触面积，如图 1—2—3 所示。

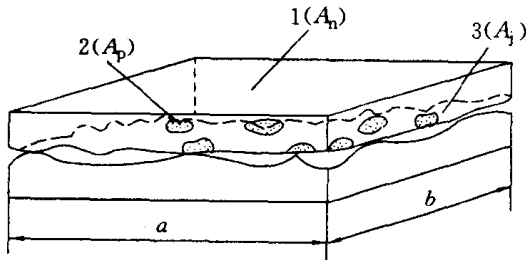


图 1—2—3 三种接触面积

1) 名义（或几何）接触面积 (A_n)

它是指两接触物体宏观边界所决定的几何面积，即具有理想光滑平面的两物体接触的面积，以 A_n 表示，如图 1—2—3 所示， $A_n = a \times b$ ，这是一般工程计算中用于求名义单位压力的面积。

2) 轮廓接触面积 (A_p)

物体的接触表面被压扁部分所形成的面积（如图 1—2—3 中小圈范围内面积）的总和叫轮廓

接触面积，以 A_p 表示，通常为 A_n 的 5%~15%， A_p 的大小与表面所承受的载荷和表面的轮廓形状有关。

3) 实际接触面积 (A_r)

轮廓接触面积内，各实际接触部分的微小面积（如图 1—2—3 中小圈内黑点所表示的接触点的面积）的总和叫实际接触面积，以 A_r 表示， $A_r = (0.01 \sim 0.001) A_n$ （接触点的直径一般为 $3 \sim 50 \mu\text{m}$ ）。

实际接触面积 A_r 随载荷的增大而增大（一般成正比），而与表面的形状和大小无关，这是由于有更多的新接触斑点产生的缘故，接触斑点的大小随载荷的增加而增大，接触斑点的平均尺寸几乎保持不变。

第二节 摩 擦

两个相互接触的物体，在外力的作用下，发生相对运动或具有相对运动地趋势时，在接触面之间产生切向的运动阻力。这个阻碍物体运动的力称为摩擦力，这种现象称为摩擦现象。

一、摩擦的分类

1. 按摩擦副的运动形式分类

- (1) 滑动摩擦：当接触表面相对滑动或具有相对滑动趋势时的摩擦，叫做滑动摩擦。
- (2) 滚动摩擦：物体在力矩的作用下，沿接触表面滚动时的摩擦叫做滚动摩擦。

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，对另一物体具有相对运动趋势（即产生微观弹性位移），但尚未发生相对运动时的摩擦。在相对运动即将开始瞬间的静摩擦为最大静摩擦，又称极限静摩擦，此时的摩擦系数称静摩擦系数。

(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。两物体之间相对运动时的摩擦系数称为动摩擦系数。

3. 按摩擦副表面的润滑状态分类

(1) 干摩擦：物体表面无任何润滑剂存在时的摩擦。但严格地讲，干摩擦是指纯净表面直接接触时的摩擦，这只能在理想洁净的干燥表面及真空条件下才可能出现，通常意义上的干摩擦称为无润滑摩擦，因为两物体表面之间通常存在着自然污染膜（也可看作润滑物质），这种干摩擦的摩擦系数，对金属来说，一般在 0.5~1.5 之间，比纯净金属表面的干摩擦系数小得多。

(2) 流体摩擦：两物体摩擦表面被具有足够厚度的润滑剂层完全隔开时的摩擦。此时润滑剂层具有体积特性，摩擦发生在润滑剂内部，属于润滑剂的内摩擦。其摩擦阻力由流体粘性阻力或流变阻力决定。

(3) 边界摩擦：两物体摩擦表面被一层极薄的（约为 $0.1\mu\text{m}$ 以下）具有分层结构和润滑性能的边界膜分开时的摩擦。此时，其摩擦、磨损不取决于润滑剂的粘度，而取决于润滑剂的粘性、润滑剂所含活性物质和润滑剂膜与物体表面的相互作用。

(4) 混合摩擦：介于上述各种摩擦之间，即摩擦表面同时出现干摩擦、流体摩擦和边界摩擦的一种混合摩擦状态，分为半干摩擦和半流体摩擦两种。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；半流体摩擦是指在摩擦表面上同时存在着流体摩擦和边界摩擦。

二、古典摩擦定律

1. 古典摩擦定律概念

古典摩擦定律也叫库仑摩擦定律或滑动摩擦定律，一般适用于固体干摩擦的情况。其内容是：

(1) 摩擦力的大小与接触面间的法向载荷成正比，而与接触物体间名义接触面积的大小无关，即

$$F = \mu \times N$$

式中 F ——摩擦力，N；

N ——法向载荷，N；

μ ——摩擦系数（分为静摩擦系数 μ_s 和动摩擦系数 μ_k ）。

- (2) 摩擦力与接触物体相对运动的速度方向相反。
- (3) 摩擦力的大小与物体接触面间的相对滑动速度无关。
- (4) 静摩擦力的极限值大于动摩擦力。

2. 古典摩擦定律参数讨论

古典摩擦定律对于一般的工程实际问题是适合的，但近年来的摩擦学研究表明，由于受当时生产和科学技术水平的限制，古典摩擦定律不够完善和精确，只能近似反映摩擦现象的一般规律，现就其中某些参数讨论如下：

(1) 摩擦力与正压力。实际表明，当法向载荷不很大时，摩擦力和法向载荷成正比关系，但当法向载荷很大时，实际接触面积将接近于名义接触面积，这时摩擦力和载荷之间将不存在正比关系。对于某些很硬（如钻石）或很软（如聚四氟乙烯）的材料，摩擦力不和法向载荷成正比。

(2) 接触面积。对于具有一定屈服极限的材料（如金属材料）来说，由于摩擦副表面粗糙度的存在，只在很小的接触区域内才有真正的接触，故可以说摩擦力的大小与名义接触面积无关，但试验表明对于光滑表面，摩擦力将随着表面粗糙度的减小，实际接触面积的增大而增大，尤其是对于十分洁净和光滑平整的表面，由于在接触表面之间出现强烈的分子吸引力，此时摩擦力将与名义接触面积有关，此外，弹性和粘弹性材料的摩擦力也与名义接触面积有关。

(3) 滑动速度。试验研究表明，对于许多材料来说，摩擦系数与滑动速度有关，尤其是对粘弹性材料，其关系更为明显。各种材料不但随着滑动速度的增加其摩擦系数降低，而且在不同的载荷下，滑动速度和摩擦系数的关系也有所不同，古典摩擦定律之所以得出“摩擦力与滑动速度无关”的结论是由于当时速度非常低，还没有出现现代高速机器所致。

(4) 摩擦系数。试验研究表明，粘弹性材料的静摩擦系数不一定大于动摩擦系数，也有认为这类材料不存在静摩擦的。还应指出，摩擦系数 μ 的数值并不是某种材料固有的特性，它的大小除取决于材料本身的物理、机械特性和工作条件外，还与所处的环境有关，因此，不能任意使用各种手册上没有具体说明获得该数据条件的摩擦系数数值。此外，在一般情况下，干摩擦状态的摩擦系数最高（ $\geq 10^{-1}$ ），边界摩擦状态的摩擦系数次之（ $< 10^{-1}$ ），流体摩擦状态下摩擦系数最低（ $< 10^{-2}$ ）。

三、摩擦理论概述

长期以来，人们对摩擦现象进行了大量的试验研究，从各个不同的角度来探讨摩擦机理，并提出了各种摩擦理论来阐明摩擦的本质，但至今仍未形成统一的理论，到目前为止，有如下几种主要的摩擦理论。

1. 机械摩擦理论

机械摩擦理论是在17世纪末18世纪初形成的，它把摩擦的起因说成是由于表面上存在着粗糙凸起，当两个固体表面接触时，由于这些粗糙凸起相互啮合，而产生了阻碍两固体滑动的阻力，在这里，固体是被当作绝对刚体来研究的，因此称之为机械摩擦理论。

实践表明，机械摩擦理论仅适用于粗糙表面，当表面光洁到表面分子吸引力发生作用时，该理论就不适用，它无法解释表面越光滑，摩擦系数反而增大这一现象。

2. 分子摩擦理论

随着表面加工技术与测试技术以及物理学的发展，人们又提出了分子摩擦理论，认为产生摩擦力的真正原因在于摩擦表面上存在着分子力的作用，表面愈光滑，摩擦就愈大，因为

光滑的表面相互接近时,表面的分子力的影响会增大。为此,在分析摩擦时充分考虑了分子间的相互作用。

3. 分子—机械摩擦理论

机械摩擦理论和分子摩擦理论进行了长时间的争论,最后由分子—机械摩擦理论进行了统一。分子—机械摩擦理论认为:在干摩擦时,由于物体表面存在凹凸不平的微凸体,因此,当两个物体表面接触时只是微凸体间的接触,实际接触面积只占名义接触面积的很小部分,并随载荷的增大而增大,在很大的单位压力作用下,会同时出现表面微凸体相互压入、啮合,并且相接触的表面存在分子吸引力,因此,摩擦具有二重性,不仅要克服表面分子相互吸引力,而且要克服表面微凸体引起的机械变形阻力。

4. 摩擦的粘着理论

本世纪中期,随着对固体摩擦研究的深入,提出了摩擦的粘着理论,认为摩擦力 F 为摩擦力的粘着部分 $F_{粘着}$ 和摩擦力的变形部分 $F_{变形}$ 之和,即

$$F = F_{粘着} + F_{变形}$$

1) 简单的粘着理论

简单的粘着理论是基于下面的事实提出的,即当两个金属表面相互接触时,只是表面微凸体的顶端接触,由于实际接触面积很小,接触点处的应力很高,接触开始时发生弹性变形,进而发生塑性变形,材料表面的塑性变形,使实际接触面积不断增大,一直到实际接触面积足以支承外载荷为止。

对理想的弹—塑性材料来说, $F_{变形}$ 很小,只占全部摩擦力的百分之几,可以略去不计,则有

$$F = F_{粘着} = A_r \tau_b = (N/\sigma_{sy}) \times \tau_b$$
$$\mu = F/N = \tau_b/\sigma_{sy}$$

由此也说明了两条摩擦定律,即摩擦表面材料一定时,摩擦系数与名义接触面积 A_r 无关;摩擦力和载荷成正比。

以上的分析是建立在理想的弹—塑性材料的基础上,忽略了冷作硬化的影响,与实际情况有一定差别,为了更接近实际情况,以较软金属的剪切强度极限 τ_b 代替金属粘结点的剪切强度 τ_b ,则摩擦系数

$$\mu = \tau_b/\sigma_{sy} = \text{较软金属材料的剪切强度极限} / \text{较软金属材料的压缩屈服极限}$$

此外,要想得到较低的摩擦系数 μ ,可以在较硬的金属表面覆盖一薄层软金属。这样,材料的承载能力由硬金属主体来保证(其 σ_{sy} 大),而剪切则发生在较软金属薄层内(其 τ_b 小),因此摩擦系数降低,这就是许多滑动轴承衬材料减摩的原理,也是许多润滑剂作用和新型润滑剂研制的一个理论依据。

2) 修正的粘着理论

简单摩擦理论在静摩擦时比较正确,但当表面相对滑动时,还要受到切向力的作用,这时实际接触面积的增大是由于法向载荷与切向载荷共同作用的结果,也可以说,接触点发生屈服是由法向应力和剪切应力共同作用的结果,即

$$A_r^2 = (N/\sigma_{sy})^2 + \alpha(F/\sigma_{sy})^2$$

其中,右边第一项 (N/σ_{sy}) 是从简单粘着理论得出的实际接触面积,只考虑了法向载荷的作用,而第二项 $\alpha(F/\sigma_{sy})$ 为切向载荷或摩擦力引起的实际接触面积的增大值,这就说明纯净表面摩擦时,实际接触面积可能增加很多,摩擦系数因此增大。