

润滑工



.2

中国机械工程学会摩擦学学会

机械工业出版社

润 滑 工

中国机械工程学会摩擦学学会 编

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)
(北京市书刊出版业营业登记证出字第117号)

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092 1/32·印张 9 1/2·字数 209 千字

1986年12月北京第一版·1986年12月北京第一次印刷

印数 0,001—3,750·定价 2.00 元

统一书号: 15033·6393

前 言

随着科学技术与生产水平的提高，各工业先进国家无不认为要使用好现代的机器设备必须十分重视机器设备的润滑工作。润滑技术已经成为一门内容丰富、涉及面很广和专业性很强的学科。搞好了机器设备的润滑工作，可以降低机器运动零件的摩擦，节省能源消耗；可以减轻机器运动零部件的磨损，节省维修和更换配件；还可以提高设备完好率和延长其使用寿命，提高生产力和节约基建投资。

中国机械工程学会摩擦学学会鉴于此，近几年组织开办或协助各地区、各部门开办了多种形式的摩擦磨损和润滑学习班，编写了相应的讲义教材。《润滑工》一书就是在这个基础上吸收各地区的讲义资料进行整理编写的。初稿由陕西地区从事润滑的同志为主集体写成后，由摩擦学学会在上海主持召开审稿会，应邀参加会议的各地工厂、研究所和高等院校的有关同志对初稿提出了很多有益的修改意见。会后请专家、教授、工程师们执笔进行了修改或改写。本书所介绍的内容是润滑工人和管理人员须要掌握的基本知识。本书可供工厂企业等单位培训润滑工人和技工学校教学参考之用，也可供润滑工自学用。

本书第一章润滑的基本概念由白元章同志组稿，第二章润滑油由郑振民、朱承修、杨殿伦同志组稿，第三章润滑脂由包长福、李显铭同志组稿，第四章固体润滑由张祖荫同志组稿，第五章添加剂由赵思源、韩长宁、高达德同志组稿，第六章机器零部件的润滑由杨玲娣、王怀勋同志组稿，第七章机器设备的润滑装置由杨开寿、王怀勋同志组稿，第八章切削润滑剂由廖明福、李毅新同志组稿，第九章废油回收与再生由廖明福同志组稿，第十章设备润滑管理由刘鑫龙同志组稿，第十一章密封、密封件与防漏由许宁同志组稿。全书由王毓民同志主编，张祖荫同志审校。

目 录

前言	
第一章 润滑的基础知识	1
引言	1
第一节 摩擦	1
第二节 固体表面的性质及接触情况	4
第三节 摩擦力	6
第四节 磨损	9
第五节 润滑	13
第六节 简短的小结	23
第二章 润滑油	25
第一节 润滑油的质量指标	26
第二节 内燃机油	52
第三节 机械油	62
第四节 齿轮油	67
第五节 液压油	75
第六节 汽轮机油	78
第七节 压缩机油	80
第八节 冷冻机油	84
第九节 汽缸油	87
第十节 导轨油和液压导轨油	89
第十一节 变压器油	92
第十二节 油膜轴承油	95
第三章 润滑脂	98
第一节 润滑脂的特性、组成和分类	98
第二节 润滑脂的主要质量指标及其性能评价	101
第三节 润滑脂的主要品种和性能以及应用范围	107
第四节 润滑脂的选择	115
第五节 润滑脂的使用与保管	119
第四章 固体润滑	124
第一节 对固体润滑材料的要求、固体润滑材料的	

	优缺点及种类	124
第二节	常用的几种固体润滑材料	125
第三节	固体润滑剂的使用方法	132
第五章	润滑油添加剂	133
第一节	清净分散剂	134
第二节	抗氧化添加剂	138
第三节	增粘添加剂	141
第四节	降凝添加剂	144
第五节	油性剂和极压抗磨剂	146
第六节	防锈添加剂	150
第六章	机器零部件的润滑	154
第一节	轴承润滑	154
第二节	齿轮润滑	164
第三节	导轨润滑	168
第四节	蜗轮副的润滑	171
第五节	离合器和联轴器的润滑	173
第六节	传动链的润滑	175
第七节	钢丝绳的润滑	176
第八节	汽缸的润滑	179
第七章	机器设备的润滑装置	182
第一节	润滑方法及润滑油脂的进给装置	182
第二节	润滑油的过滤装置	191
第三节	润滑油脂的检查及保护装置	194
第四节	循环润滑系统中的油泵、油管 and 油箱	198
第五节	润滑工具	198
第八章	切削润滑剂	201
第一节	金属切削过程中的润滑特点	201
第二节	切削润滑剂的作用	203
第三节	切削润滑剂的组成和分类	205
第四节	切削润滑剂的添加剂	209
第五节	常用切削润滑剂	213
第六节	切削润滑剂的选用	222

第七节	切削润滑剂的质量检查	226
第八节	乳化液的回收与处理	228
第九章	废油回收与再生	233
第一节	润滑油老化及鉴定	233
第二节	废油的回收与保管	236
第三节	废油的再生方法	237
第四节	再生油的使用	247
第十章	设备润滑管理	250
第一节	设备润滑管理的组织机构	250
第二节	设备润滑管理制度	251
第三节	设备润滑管理人员岗位职责	254
第四节	设备润滑五定内容	256
第五节	换油周期与油料消耗定额	258
第六节	设备润滑工应知应会	259
第十一章	密封、密封件与防漏	264
第一节	机械运动部位和静接合部位的泄漏	264
第二节	密封原理	267
第三节	密封件类别	268
第四节	密封件	269
第五节	密封胶	287
第六节	防漏方法	290

第一章 润滑的基础知识

引 言

各种机器在工作过程中，所有相互作用运动着的零部件都有摩擦现象，同时也就必然产生摩擦阻力，造成能量损失，使零部件温度升高，导致零部件磨损。由于磨损量的不断增加，机器的性能和工作质量将逐渐下降。当零部件磨损量积累到一定程度后，再继续使用是不经济的，甚至是危险的，于是就要修理或报废更换。为降低摩擦阻力以减少能量损失，为减轻磨损以提高机器的使用寿命和减少维修费用，就必须对机器的某些零件进行润滑。润滑工作做好了，可以提高使用机器的可靠性和经济性。所以，润滑工作是保证机器设备正常生产的一项绝对不能忽视或轻视的主要措施。

第一节 摩 擦

一、摩擦及常见的摩擦种类

当你站在倾斜的地面上及走路时，是否想到：为什么能站在斜面上？为什么斜面愈陡，站着愈吃力？为什么当斜面陡到一定程度后，就非滑下去不可？在滑下去以前及下滑时，你与地面间是什么情况？当走路时，你的鞋与地面间是什么情况？为什么能在路上走？为什么在不同地面（如土地、柏油路、砂石路、沙漠地或冰地）上走路时会感到用力不同？为什么当地面有水时，容易滑倒？当你走一段路后，鞋底就被

磨损，为什么在不同路面上走 鞋底磨坏的快慢不同？等等。本文不拟直接回答这些问题。但希望读者在看完本章后，能自己来解释这些问题。并能解释所碰到的其它类似问题。

先做个试验。如图1-1所示，取一个量为十牛顿的铁块 2 放在平的钢板 1 上，忽略砝码盘 3 的重量和支撑滚轮 5 的可能有的阻力。铸铁与钢板接触的表面为无水、无油的干净表面。我们在砝码盘上逐渐加力。如开始加一牛顿，铸铁 2 未动；加到二牛顿，2 未动；到三牛顿，2 仍未动；若加到稍大于三牛顿时，2 就开始滑动了，并且 2 一旦动起来，就加速滑动。在此试验中，从开始加力到滑动起来以后的全部现象称为滑动摩擦。即物体 2 和物体 1 间发生了滑动摩擦。以开始加力到加到三牛顿时以前，物体 2 在物体 1 上要动（即有滑动的趋势），但还未动，这阶段的现象称为静滑动摩擦。一旦动起来以后的滑动摩擦现象，称为动滑动摩擦，

所谓物体是静止的，或是将要运动但尚未运动的，或是已经运动起来了，是指相互作用的两物体是相对静止的，还是相对运动的。所谓相对运动是指：我们站在物体 1 上看物体 2 是否在动。例如，我们坐在行驶的车上，此时人和车一

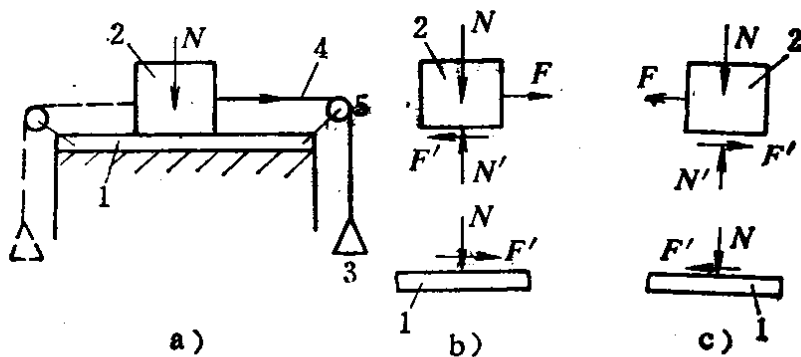


图1-1 滑动摩擦试验

1—钢板 2—铸铁 3—砝码盘 4—拉绳 5—支撑滑轮 N —载荷压力 N' —反作用力 F —水平牵引力 F' —滑动摩擦力

起相对地面作运动，但人与车之间无相对运动（相对静止）。根据图 1-1 的试验，我们可以归结为：任意两物体 1 和 2 相接触并存在相对运动或相对运动趋势的这一现象，称为摩擦，即这时物体 1 和 2 间发生了摩擦。如果相对运动是滑动（如图 1-1 试验），则称为滑动摩擦。如果相对运动是滚动（例如球或滚子在钢板上滚动），则称为滚动摩擦。

在图 1-1 的滑动摩擦试验中，我们在两摩擦面（即摩擦中两物体的接触面）上及两摩擦面之间，没有特意加任何其它物质。这时的摩擦称为干摩擦。如果在摩擦面上加少量的油和水，再做同样的试验，你会发现在外力加到三牛顿以前物体 2 就开始滑动了。这种两摩擦面间存在着油或水时的摩擦，称为湿摩擦（属于润滑摩擦）。

二、摩擦力和磨损

(1) 摩擦力 使两个相接触的物体间发生摩擦现象时为什么必须外加一定的力呢？这是因为在两个摩擦面上必然作用有阻碍发生摩擦现象的力量。此阻碍力量称为摩擦力。在静摩擦（如图 1-1 试验，当外力加到三牛顿以前时，存在滑动趋势的摩擦）过程中，摩擦力的大小是变化的。它随着作用的外力增加而增大，但有个最大值（图 1-1 试验中为三牛顿），外力大于此值即产生相互滑动，习惯上称此最大值为静摩擦力。一旦动起来以后，为维持其等速滑动，还必须保持一定的外加力，以克服此时的摩擦力——动摩擦力。一般动摩擦力比静摩擦力要小一些。这是一般固体间干摩擦时存在的现象。

为维持等速滑动（或等速滚动）所加的外力要作功，就要消耗一定的能量。这时消耗的能量绝大部分转变为热量，使机件发热。由于发热还会带来一些其它问题。由此可见，希望摩擦力越小越好，以达到省力和节能。但在有些地方，如

使用螺纹联接，皮带传动、摩擦离合器、制动器等时，则希望有大的摩擦力，以保证可靠地工作。

(2) 磨损 两物体经过较长时间的摩擦以后，你会发现摩擦面的形状尺寸改变了（时间短可能是极微量的），这是由于在摩擦过程中，摩擦表面材料不断地发生微量转移或脱落，这就是磨损。材料转移，可能在物体自身的摩擦面上，从一个部位转移到另一部位；也可能从一个物体的摩擦面转移到另一个物体的摩擦面上或转移到摩擦外去。磨损的结果，改变了机件表面的性质，改变了机件的形状和尺寸，改变了两机件间的关系（如滑动轴承的间隙增大），改变了两机件共同工作的性能。当磨损到一定程度后，由于机件共同工作性能变坏，再继续使用，保证不了设备的性能要求，甚至会造成事故。此时，就应对两机件进行维修或更换。在维修或更换该机件前，其总工作时间为该机件的磨损寿命。

根据以上分析，任何要开动的机械设备，必然出现具有不同摩擦现象的部位。而在每一摩擦部位，必然存在摩擦力。从长期来看，磨损是不可避免的。在图1-1的试验中看到，只要在两摩擦面间加少量的油或其它润滑物质，摩擦力就降低，同时磨损也减少，这就是润滑。所以，在这些希望减少摩擦以提高效率、减少能量损失、减少磨损、延长使用寿命的部位，必须进行润滑。

第二节 固体表面的性质及接触情况

当相接触的两物体相互摩擦时，摩擦力和磨损是作用和发生在相摩擦的表面上和表面层之内。所以，要进一步了解摩擦力和磨损发生的情况，就必须对物体表面及两表面间相接触的情况有所了解。

1. 固体表面的几何性质

任何固体表面，无论如何进行加工，都不可能达到理想的平整光滑的要求。实际上，必然或大或小地存在一定的误差。如图1-2所示：从总体看存在一定的斜度(形状误差)；从

局部来看存在一定的波度；从微观看存在一定的粗糙度。只是加工精度不同，其误差和粗糙程度不同而已。就像地球那样，从月亮上看是一个球体，但实际上有很多不同高度的山脉，丘陵和平原。就是平原，也是坑坑洼洼的。海水面也是不平的，

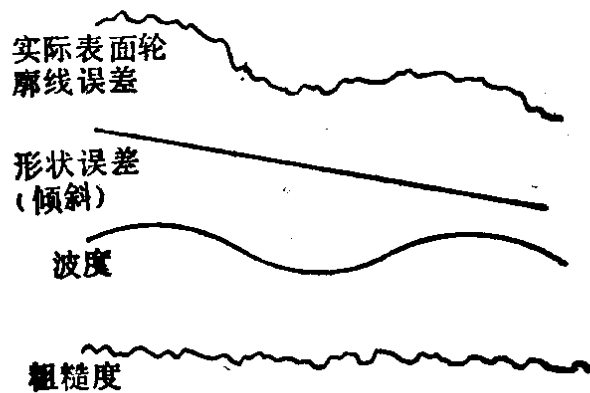


图1-2 固体表面的几何性质
实际表面轮廓线误差包括形状误差、
波度和粗糙度

首先是随地球的球面而弯曲，更何况波浪滚滚呢？这说明，观察的精度不同，会得到不同的印象。

2. 固体表面的物理性质

由于物体表面与环境空气、水汽或其它物质如尘埃相接触，其表面的化学组成和物理性质一般与物体内部不同。特别是在加工过程中表面产生高温，促使其差别更大。只有在真空中加工出的新表面，才能认为与其内部在成分上是一样的。就是这样，其表面与体内相比，在某些性质上也有差异。

3. 两固体表面接触的情况

由于两固体表面都不是绝对平整光滑的，这样两个固体表面接触时，在相互接触的面积上，就不可能在所有点上都全部相接触。只有少数的凸出部分——微凸体相接触，如图1-3所示。其实际接触面积就是这些接触凸体上微小接触面

的总和。一般实际接触面积只占外观接触面积(图1-3 a 中的 $a \times b$) 的万分之几到百分之几, 并随着外作用压力的增加而加大。其它部分存在着小的间隙。两固体接触面间不加垫片或涂料时, 将会漏气、漏水、漏油就说明了这一点。

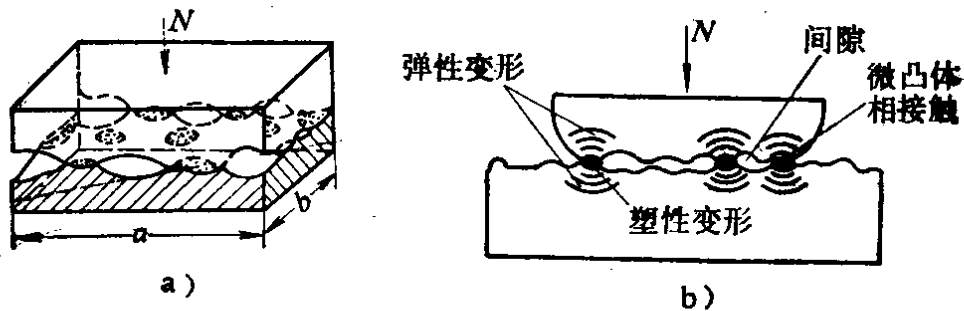


图1-3 两固体表面接触情况

第三节 摩 擦 力

1. 摩擦力的性质与摩擦系数

在第一节中曾谈到, 当两物体相摩擦时, 在两摩擦面上, 必然分别受有与本件相对运动方向相反的力, 阻碍摩擦现象的发生, 此力称为摩擦力 \ominus 。两物体所受的摩擦力的大小相等, 方向相反。如图1-1 b 所示, 当物体 2 相对物体 1 向右滑动时, 物体 2 所受的摩擦力向左, 物体 1 所受的摩擦力向右。若 2 相对 1 反向运动, 物体 1 和物体 2 所受摩擦力都反向, 如图1-1 c 所示。亦即, 所受摩擦力的方向决定于该物体相对另一物体的运动方向, 并且始终与其相反。

摩擦力的大小与两相摩擦物体的材料匹配有关, 与环境条件有关, 与作用载荷(接触面上的法向压力)有关, 有的还与滑动速度有关。如果法向压力为 N , 摩擦阻力为 F , 则

\ominus 摩擦力过去多简称为摩擦, 致使与摩擦代表的现象相混, 应加以区别。因为它是发生在摩擦现象中, 其方向永远与相对运动相反, 是阻碍发生摩擦现象的力。本文中仍称摩擦力。

$$\mu = \frac{F}{N}$$

μ 称为该物体材料在一定条件下的摩擦系数。相对运动为滑动时，其 μ 就是滑动摩擦系数。

两物体材料匹配不同时， μ 值是不同的，同一对相配材料，干摩擦与湿摩擦的摩擦系数也不一样。有的滑动速度不同， μ 也改变。

静摩擦中，摩擦力的大小是变化的，其最大静摩擦力， $F_{静}$ 与 N 之比称为静摩擦系数用 $\mu_{静}$ 表示。动摩擦中的摩擦力 $F_{动}$ 与 N 之比为 $\mu_{动}$ ，称动摩擦系数。典型摩擦系数的数值关系如表1-1。

表1-1 几种相配材料的滑动摩擦系数①

摩擦副 材料匹配	静摩擦系数		动摩擦系数	
	有润滑	无润滑	有润滑	无润滑
钢—钢	0.15	0.1~0.12	0.15	0.05~0.10
钢—铸铁	0.30	—	0.18	0.05~0.15
钢—青铜	0.12	0.08~0.12	0.10	0.07~0.10
青铜—钢	—	0.10	0.20	0.07~0.10
金属—木材	0.5~0.6	0.1~0.2	0.3~0.6	0.1~0.2
金属—皮革	0.3~0.5	0.15	0.6	0.15

① 本数据引自B. И. Анурьев, 机械制造设计手册, 1978年版。

欲使球或滚子在平面上滚动，也必须外加一力，以克服滚动中的阻力。此阻力称为滚动摩擦力。一般说来滚动阻力比滑动阻力小得多。亦即，在同样的材料匹配和环境条件下，滚动摩擦系数比滑动摩擦系数小得多。

2. 滑动摩擦阻力的形成

在干摩擦条件下，两物体接触时，只有少数微凸体接触。

全部载荷就作用在这些小微凸体上。因而，其单位面积上的压力是很大的。以致微凸体发生塑性变形，而其附近发生弹性变形，图 1-3b。该处两表面材料分子紧紧相接，由于分子间吸引力作用而发生粘附。欲使两物体相对滑动，第一，必须克服粘附部位的分子吸引力，阻碍剪断粘附的力，称为滑动摩擦阻力的粘附作用。第二，微凸体塑性变形和不断地弹性变形，也要消耗一定的能量，这是摩擦阻力的迟滞作用部分。

另外，由于表面不平，接触中使两表面的不同峰谷彼此嵌入。滑动时，较硬材料表面将较软材料表面划伤——严重塑性及弹性变形，也需要消耗能量。这就是造成滑动阻力的第三个原因，称为滑动摩擦阻力的犁沟作用。

3. 滑动摩擦力的大小与什么有关？

根据滑动摩擦力产生的原因可以看到，两材料分子间的吸引力或互溶性越大，摩擦阻力就越大；塑性和弹性变形能量损失大，阻力就大。这说明摩擦系数的大小首先决定于相配的两个材料（注意：不是一个材料）。一般说来同一种类的材料相配，分子吸引力或互溶性就大，滑动阻力就大。因而在希望滑动摩擦阻力尽可能小的那些地方，不宜采用同一种类的材料相配。如滑动轴承中，与钢轴配合的轴瓦就不能用钢材，要用铸铁或铜合金等等。

从滑动摩擦阻力的犁沟作用看，表面越粗糙，阻力会越大。所以，为降低摩擦力，应降低零件表面加工粗糙度，特别是降低较硬件的表面加工粗糙度。但要注意，当两表面加工粗糙度小到一定程度后，如不采取其它措施，其摩擦阻力反而更大了。这是由于两表面的实际接触面积增大，使分子吸力形成的粘附作用加大的结果。

另外，由图 1-1 的滑动摩擦试验可以看到，摩擦面上有

少量油、水或其它物质存在，会使摩擦力降低。这说明，滑动摩擦阻力的大小与摩擦面上有无其他物质有很大的关系。

第四节 磨 损

磨损也是摩擦现象中不可避免的问题。它与摩擦力同是摩擦中基本上同时存在的两个问题（注意：不是一个问题，不能把磨损与摩擦力简单地看作因果关系）。有的地方希望磨损快一些，如各种刀具刃磨、各种磨削加工、新机件的跑合等。更多的地方则希望磨损越慢越好，以延长使用寿命，如摩擦离合器的摩擦片、轴承、导轨、齿轮及各种刀具等。

1. 磨损量的发展情况

磨损量 Q 可以用被磨掉的材料重量表示，也可用被磨件尺寸的减小量来表示。磨损量是逐渐积累的，随工作时间的延长而增加。对不同材料的摩擦副，其磨损量 Q 与工作时间 t 的关系不同。一般金属材料摩擦副的 $Q-t$ 典型关系如图1-4所示。从图中可以看出就装配的零部件从开始运转到最后报废，其磨损量的发展过程可分为三个阶段。第一阶段，曲线 Oa 段，所用的时间 t_1 ，磨损量达到 Q_1 。时间短，磨损快。这是由于新加工件表面比较粗糙，特别是加工误差和装配误差使两件不完全相适应。此阶段称为跑合阶段。曲线 ab 段，摩擦副工作条件改善了，磨损量大大减慢。此时设备工作良好，磨损慢而稳定，经过时间 t_2 ，其总磨损量达到 Q_2 。这

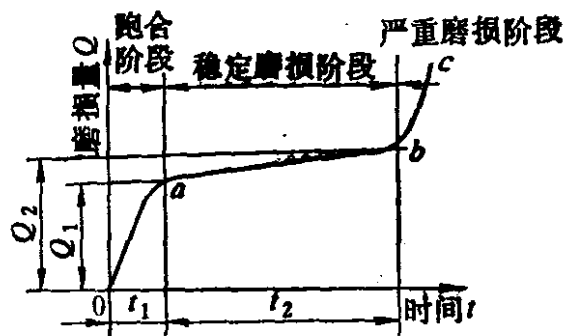


图1-4 磨损量与时间的关系

一阶段称为稳定磨损阶段。曲线 bc 段，磨损又迅速加快。这是因为总磨损量达到 Q_2 后，摩擦副的工作条件变坏了。如滑动轴承或汽缸与活塞间，由于长时间运转积累的磨损量加大，间隙太多，造成润滑不良和动载荷增加，工作性能迅速降低；不经济，甚至会造成事故。曲线 bc 段称为严重磨损阶段。曲线 ab 段为稳定磨损阶段，是该摩擦副的正常工作阶段。时间 t_2 就是该摩擦副的磨损寿命。

我们希望：(1)用尽可能短的跑合时间 t_1 ，即达到必要的磨损量 Q_1 ，即此阶段磨损快一些为好。(2)在允许一定的磨损增量 $\Delta Q = Q_2 - Q_1$ 的条件下，尽可能使 t_2 （寿命）延长，即希望在正常工作阶段中，磨损越慢越好。润滑的任务之一，就是要达到此目的。

2. 磨损的产生

从摩擦力形成原因的分析中也可以看到磨损的产生大致有以下几种情况：

(1) 粘附磨损 在相接触的微凸体部位，由于分子吸力使两摩擦面有部分粘附在一起。当滑动时，材料性能较强的摩擦面就可能将另一摩擦面上的部分材料粘掉，造成磨损。

(2) 磨粒磨损 在前面分析犁沟作用时谈到，较硬表面的微凸体在较软材料表面上形成划痕，就像用锉刀锉一机件表面那样，使该表面材料部分脱落形成磨损。也可能使较软材料表面在滑动方向上产生塑性变形，这部分材料被挤到另一地方去，这也是磨损。

在两摩擦面间，如存在硬的微小颗粒，就会在摩擦中发生研磨作用，将两摩擦面表层材料磨掉或转移，形成磨损。硬颗粒的来源，可能是由于密封不好，从外面进到摩擦面中的；也可能是从摩擦面上磨掉的颗粒，未能及时清除而存在于两

摩擦面间的。

以上两种情况，由硬颗粒或硬微凸体作用造成的磨损，称为磨粒磨损。

(3) 疲劳磨损 两摩擦面上不断地多次接触的微凸体，虽然只产生一定的弹性变形(未发生前两种磨损)，但经过一定时间后，表面也会发生小块脱落，在摩擦面上出现小坑，这就是疲劳磨损。

(4) 腐蚀磨损 若发生摩擦现象的部位周围有腐蚀性气体或液体，摩擦面表层材料将被腐蚀，如同钢铁材料生锈那样。已腐蚀的这层材料，一般性能较差，在摩擦过程中很易被磨掉。这层被磨掉后，新表面又被腐蚀，再磨掉，再腐蚀，这种磨损称为腐蚀磨损。

在实际摩擦磨损中，以上几种磨损形式是综合存在的，只是随条件的不同，其发生的先后不同、程度不同，或一种形式的磨损掩盖了另一种形式的磨损。

3. 典型磨损示例

磨坏的零件是很多的。以下介绍五种典型的严重磨损实例(图1-5)。这些磨损形式的发生都是与润滑工作有关的。从中可以看出供油质量的重要性。

原因：配合间隙过大或过小；使用润滑油不当、油量不足或油压过低；进入灰尘、异物；突然高负荷或陡然停车等原因，破坏了两者的

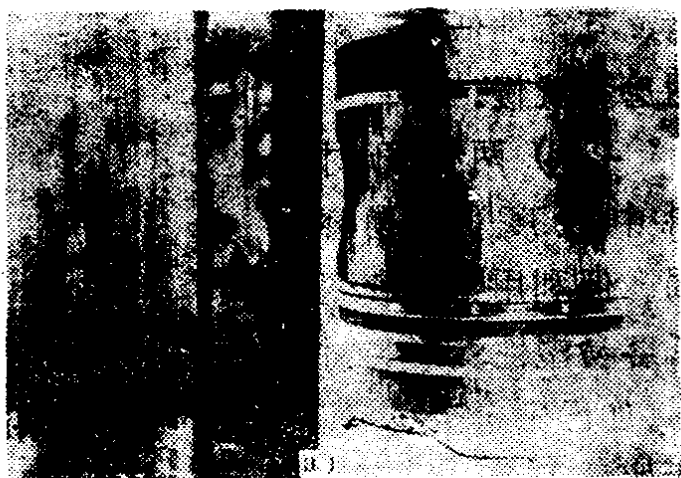


图1-5a) 汽缸与活塞咬死