

打开摩擦世界的大门

摩擦时时刻刻伴随着人类的活动，有时对人类展现其温柔的一面，但经常是露出其狰狞的面目，人类想要驾驭这一自然物理现象，就不得不认识它、研究它。

生命在于运动

有一句至理名言想必大家都耳熟能详“生命在于运动”，为什么呢？《吕氏春秋》言明“流水不腐，户枢不蠹”。斗转星移，云卷云舒，花开花落终有时，冬去春来莫须问，我们周围的一切都处在不断的运动当中。你也许会说，我坐在这里就没有动呀！表面上看你是没有动，其实组成你身体的各种细胞它们是运动的，只是我们感觉不到而已。

运动最简单的形式莫过于一个物体相对另外的一些物体的移动，即所谓的机械运动。

乡下城里，人们穿梭忙碌，车水马龙。火车在铁轨上快速奔驰，飞机在头顶上掠过长空。田野里，农民劳作。工厂里，机器轰鸣。河水潺潺，鱼儿在水里快乐地游动；风儿飘飘，鸟儿在风里不停地穿梭。

如果您注意观察，所有这些各种各样的运动都有一个共同的特点，即一个物体与其他物体相接触，或者同其周围的一大片液体或气体相接触，比如水和空气。当人们走在路上，鞋与地面接触；汽车要在公路上行驶；火车要在铁轨上奔驰；飞机要用它的两个巨大的机翼滑过长空，与空气发生剧烈的摩擦。

这样的接触对运动有着很大的影响。

什么是摩擦

显然，要使物体运动，就要给予动力和能量，或推或拉。一旦这个动力消失，运动就会慢慢停止，当然，在外太空是个例外。我们没有施加使物体停止的反作用力，那，是什么使运动停止了？是接触，物体与物体之间的接触使运动停止了。也就是说任何运动的物体都受到与它接触的物体的作用力，这个力阻止了运动物体的继续运动，而使其最终停止，这个力就叫做**摩擦力**，发生在接触面之间的这种现象就叫**摩擦**。

形形色色的摩擦

运动的形式多种多样，随之产生的摩擦也是花样繁多。

大体上分为两大类：**内摩擦**和**外摩擦**。顾名思义，内摩擦是指由于某种原因而使物体内部的分子产生运动，从而引起的内部能量消耗的阻抗现象。比说拿一根铁丝来回拧弯，局部会变热，这就是铁丝内部的原子间相对位移之后产生的能量损失。最容易理解的就是流体内部的摩擦是以粘度的形式表现出来的。通俗地说越粘稠的液体，它的内摩擦就越大。外摩擦就很好理解了，是指两个相接触的物体的表面作相对运动时，在实际接触区域上的切向阻抗现象。

我们通常所说的摩擦是指外摩擦，它的形式也是多种多样的。

首先按运动状态分为**动摩擦**和**静摩擦**。



图 3.1 滑雪—典型的滑动摩擦

大家都滑过雪或者是滑过冰吧（图 3.1），穿着滑雪板或冰鞋，双腿轻轻一蹬，我们就向前滑动了，然后慢慢地停下来，雪场基本上是平的，甚至是下坡路，冰面上更是平的了，是什么使我们的滑动停止了？是摩擦力。我们从头再看一下，滑雪板或雪鞋与雪地紧密接触，

我们的腿一蹬，给它们一个向前的力，在这个外力的作用下，我们向前滑动，与雪地发生相对运动，这时在雪板或雪鞋与雪地的接触面上就会产生一个摩擦力，这个摩擦力与我们滑动方向相反，从而阻止滑动，最后让我们停下来，这一现象我们就称之为摩擦，更为准确地应该称之为**滑动摩擦**。

用脚踢球，球就在地上滚动，然后停止。是什么使球停止的呢？还是摩擦力。但是，球不是在地上滑动，而是滚动，还包括我们骑的自行车、开的汽车（图 3.2）都是如此。事实说明，在滚动时同样也产生反作用力，这个力就叫做**滚动摩擦力**。



图 3.2 典型的滚动摩擦—轮子的转动

滑雪和踢足球就是典型的动摩擦。那么什么又是静摩擦呢？举个例子很好理解，比如说要移动放在桌子上的一本厚书。这需要一定的力，如果这个力小了，书是不会的动的，这时，是谁阻碍了移动呢？是书皮与桌子间的摩擦力，但是因为这时书没有动，只是存在一个相对运动的趋势，所以我们称之为**静摩擦力**，这种现象称为**静摩擦**。

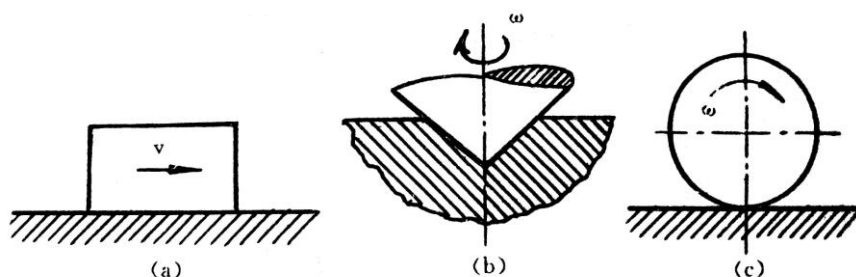


图 3.3 各种摩擦形式的示意图

按照摩擦物体的运动形式，摩擦又可以分为：滑动摩擦（图 3.3(a)）、滚动摩擦（图 3.3(c)）、转动摩擦（图 3.3(b)）和滚滑摩擦（同时发生滚动和滑动）。

还可以按摩擦物体间表面润滑状态分类：

真实干摩擦：两个洁净的物体表面间没有任何其它物质存在，这种情况只有在实验室的条件下才存在。

干摩擦：名义上无润滑的摩擦，实际上表面通常会从周围介质中吸附气体、水汽和油脂。

边界摩擦：相对运动的表面之间有极薄的润滑膜，摩擦性质与润滑剂的粘度无关，取决于两表面的特性和润滑剂的油性。

流体摩擦：即有流体将两个物体完全隔开，摩擦力的大小取决于流体的分子内摩擦，大小可通过粘度表征。

混合摩擦：顾名思义就是既有干摩擦，又有边界摩擦和流体摩擦现象。

此外，也可以按摩擦物体材料的不同分为金属间的摩擦、非金属间的摩擦（如纤维间的

摩擦，衣服与衣服之间)、金属与非金属间的摩擦，还可以根据发生摩擦的工作条件分类，常温常压下的摩擦和极端工况下的摩擦，比如说高低温、高压、真空和辐射条件下的摩擦等等。研究低温、真空和辐射条件下的摩擦对发展航天技术是至关重要的。

表面究竟是个什么样子

既然我们通常所说的外摩擦，是发生在两个相接触的物体的表面之间。那么我们就有必要仔细研究一下物体的表面到底是个什么样子。

首先用我们的眼睛来看，有镜子一样光滑的表面，也有砖头块一样粗糙的表面。那么再借助显微镜，我们来看一下光滑的表面果真如此“光滑”吗？答案是否定的。以最精的加工表面，眼睛看起来很光滑，在放大倍数不高的显微镜下就可以看到沟壑纵横，峰峦叠嶂，就像地球的表面一样。例如图 3.4，肉眼下，表面似乎很平，但在显微镜下，就是坑坑洼洼的，还有一些毛刺突起。

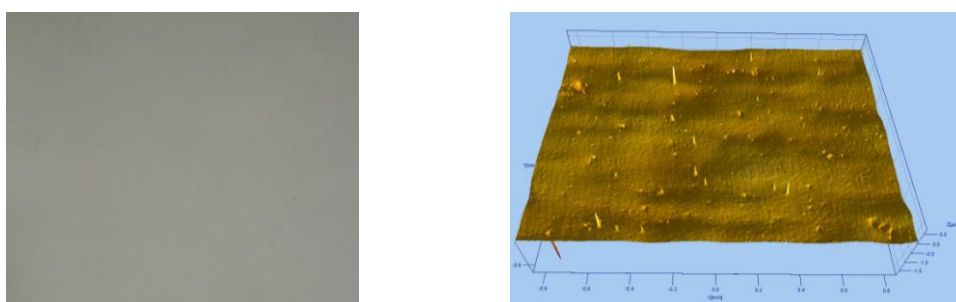


图 3.4 肉眼下的镜面及显微镜下的镜面

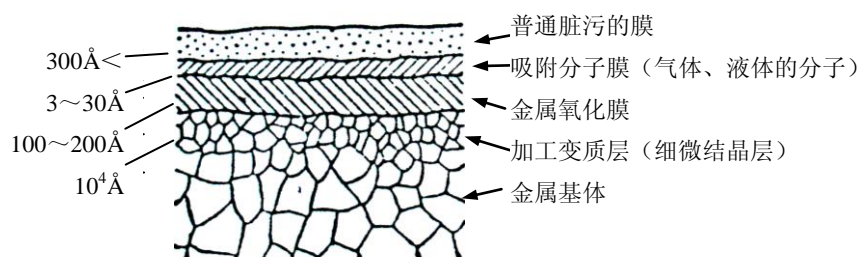


图 3.5 金属表层结构及表面状态

另外还有一个值得注意的现象就是，乍看很干净的固体表面，其实并非如此干净。固体的表面存在着各种物质覆盖的一个又一个的表面层。首先是空气分子被吸附，在表面上形成一层吸附的气体，这层气体当然非常薄，总共只有一两个分子那么厚。另外，对于大多数金属，还存在着一层薄薄的氧化层，比如说铝就特别容易氧化，在空气中铝材的表面就几乎不存在纯铝，而是氧化铝薄膜。铁比较好些，但只要在空气中停留较长的时间，表面也会形成一层氧化铁。图 3.5 是典型的金属表层结构示意图，金属表面以内可分为若干层，在金属基体材料的上部是加工后的变形层，变形层是在使用切削刀具加工过程中，由于产生形变和局部高温而使金属表面的晶格扭曲所生成的加工硬化层，该层的金相组织发生了变化，使晶粒细化，所以其硬度较高。总之，物体表面往往不是构成该物体的物质，而是一层自然污染膜，它是由杂物、氧化物、附着的气体水汽等混合起来的复杂物质。

上述的观察都是从宏观的角度出发。那么从微观上看，即从分子水平的立场上，表面与内部有什么不同。平常所见到的表面有液体的和固体的之分，两者一个是流动的，一个似乎

是固定的，其实不过是构成两者的分子和原子之间的作用力的大小不同而已。固体表面肉眼看上去是固定的，看上去好像是“死的”，但却与液体表面一样，是“活的”，也就是说它们的表面都是有能量的，最好的证据就是表面张力。

表面张力

图 3.6 分析了水分子所受到的引力作用。各个分子都受到四面八方的分子对它的引力。位于表面的分子 a，受到位于水内部的分子的引力，水表面之外只受到空气分子极小的引力，引力加和，水分子 a 所受的总引力是向水内部的，即水分子 a 会被拉向内部。同样我们可以分析出，b 分子会被比 a 分子稍小的力拉向内部。而对于位于内部的 c 分子而言，它受到的引力之和为零。也就是说，位于表面的分子都会被拉向内部。典型的例子，就是从空中落下的雨滴，因为表面的分子受到表面张力的作用，被吸引到内部，所以成圆形。

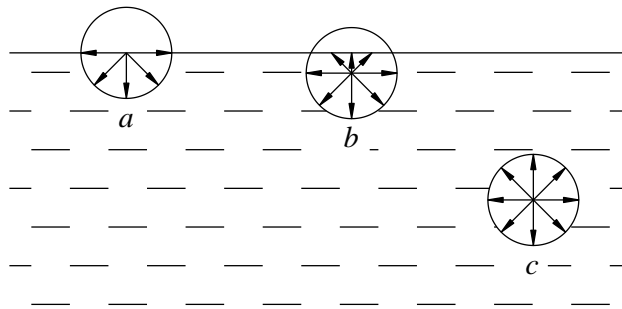


图 3.6 作用于水表面分子的引力

固体表面的情形类似，只是表面张力更大，但因构成内部的原子、分子等与液体不同，单凭表面张力不易变形。沥青比较例外，放置的时间足够长，原本有棱有角的地方也会变圆。这就是表面的分子被缓慢地拉向内部的结果。

固、液、气三界面之间的表面张力又是如何，见图 3.7。

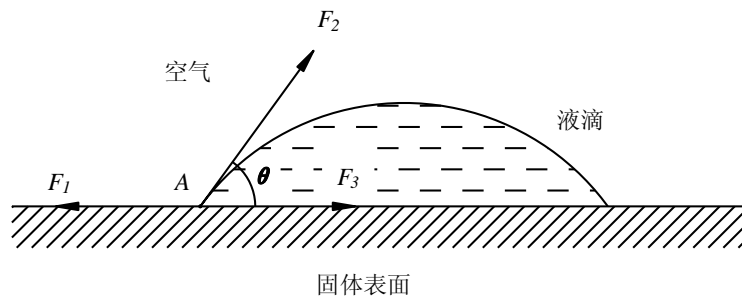


图 3.7 固体表面上的液滴所受的表面张力

假设固体与空气之间的张力为 F_1 ，液体与空气之间的为 F_2 ，固体与液体之间的为 F_3 。各表面张力平衡，即 $F_1 = F_2 \cos \theta + F_3$ ，则液体应该是稳定的。因此，在疏水性表面，因为表面张力 F_1 小，液滴成球形，不容易浸润；而在亲水性表面，因为表面张力大，液滴平铺扩延，容易浸润。观察雨后荷塘，荷叶上的雨水成圆形，因为荷叶是疏水性表面。水银撒到地上，是球形的，那是因为它本身的表面张力 F_2 非常大，所以液滴收缩变成球形。

古典摩擦定律

在日常生活和生产中，有时候我们需要摩擦力，甚至需要增加摩擦力，但大部分时候，摩擦起着阻碍运动的作用，引起能量和材料的消耗，这时就要想办法减少摩擦。所以，为了征服摩擦，应当研究摩擦现象的规律，形成控制摩擦的定律。

早在 15 世纪末就有人开始了对摩擦现象的研究。1508 年意大利的著名科学家达芬奇首

先对固体的摩擦进行了研究并提出了摩擦的基本概念，他指出：摩擦力与所加的法向载荷成正比而与其接触面积无关。后来法国物理学家阿孟顿于 1699 年发展了达芬奇的理论，建立了他自己的三条摩擦定律。最后，库伦在 1785 年做了进一步的试验研究，又完善了阿孟顿的成果，形成了阿孟顿—库伦摩擦定律，即**古典摩擦定律**，内容如下：

- 当两个相接触的物体间发生切向运动时，摩擦力的方向总是与接触表面间相对运动的速度方向相反；
- 摩擦力的大小与名义接触面积的大小无关，而只与两物体的接触面积间的法向载荷的大小成正比；
- 摩擦力的大小几乎与接触面间的滑动速度无关；
- 静摩擦力总是大于动摩擦力。

古典摩擦定律的基本公式为：

$$F = \mu N$$

式中 F 为摩擦力； N 为法向载荷； μ 为摩擦系数，古典摩擦定律认为 μ 是常数，只适用于干摩擦的情况。

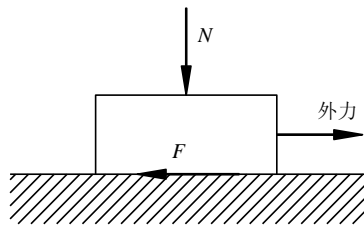


图 3.8 滑动摩擦

实用而不严密的定律

古典摩擦定律存在着一定的局限性，滑动摩擦系数是用试样做实验测定的，如果试样的表面状态有变化，就会得到不同的实验结果，各种书籍上的摩擦系数，一般来说只有参考价值，如果需要精确的摩擦系数，就必须按具体的问题中的条件做专门的实验来测定，而且同一试样必须重复做几次，取平均值作为实验结果，以减少实验误差。也就是说：古典摩擦定律是在一定条件下进行实验得到的结果，在使用它时，如果待解决的问题的条件与做实验的条件有差异，就会导致很大的误差。但它也能适用于一般的工程技术问题，因此仍然是目前广泛使用着的理论。

滑动摩擦定律的不严密性，还能用下述事实来说明。在做滑动摩擦实验时，我们只要没有有意地向摩擦面上加润滑剂，就称为干摩擦，严格来说这只是名义上的干摩擦。也就是说看起来接触面间没有其它介质存在，其实不然，物质表面上实实在在覆盖着一层成分复杂的附着膜。

那么这层附着膜对摩擦有什么影响呢？我们可用下面的实验说明：将两个铁块放在一起，测出使上面铁块产生滑动所需的力。然后将铁块放到真空室中，抽真空，再加热以驱走铁块表面附着的气体和杂质（先抽真空再加热是为了防止铁表面在加热时氧化），再抽真空，这时铁块的表面已经是纯净的表面了。这时再一次测定使上面的铁块发生滑动所需的力。结果是令人吃惊的！经过处理的纯净表面的摩擦力比未处理的有自然污染膜的大了 20 倍。

复杂多变的摩擦系数

古典摩擦定律之所以存在着一定的局限性，在于滑动摩擦系数的多变性。材料的表面性质或形貌、周围介质、环境温度、实际工作条件以及测试仪器等等，任何一方面稍微的风吹草动都会对摩擦系数产生影响。它为什么会如此多变呢？我们来逐一分析一下。

表面膜对摩擦系数的影响

如前所述,大多数金属的表面在大气中会自然生成与表面结合强度相当高的氧化膜或其它污染膜。也可以人为地用某种方法在金属表面形成一层很薄的膜,如硫化膜、氧化膜、软金属膜(铟、锡、铅等)。这些膜在一定厚度内不会改变实际接触面积的大小,但会使金属表面的物理化学性质与基体金属不同,通常膜的剪切强度低于基体金属的剪切强度。具有表面膜的摩擦物体之间摩擦主要发生在膜间,金属与金属不易粘着。由于表面膜的存在,摩擦力和摩擦系数都会随之降低。

材料的性质对摩擦系数的影响

金属材料摩擦副的摩擦系数随着材料的性质不同而各异。通常互溶性较大的金属摩擦副因其较易粘着,故摩擦系数较大;而互溶性差的金属摩擦副一般不易粘着,故其摩擦系数较小。

温度对摩擦系数的影响

当摩擦的两物体间发生相对运动时,温度将升高。天冷时,我们互搓双手取暖就是这个道理。这种温度的变化将使材料的表面性质发生变化,从而使摩擦系数发生变化,这种变化的形式是千奇百怪的。

有时摩擦系数可能随着温度的升高而增大,当达到某一最大值时又开始减小。有时摩擦系数又随着温度的升高而降低,当达到某一最小值时又开始升高。是不是很有意思!

一般固体的干摩擦系数大多数都随温度的升高而降低。例如,鲍登就发现,镍-镍、铜-铜摩擦系数都随温度的升高而降低。

滑动速度对摩擦系数的影响

大量的实验和实践证明,滑动速度对摩擦系数也是有影响的,对于不同材料,在不同条件下,滑动速度对摩擦系数的影响也是不同的。随着速度的增大,有的降低,有的升高,也有的基本不变,还有先升高再降低的,如是,变化多种多样。

载荷对摩擦系数的影响

库伦摩擦定律认为摩擦系数与载荷无关,而实践表明,金属间的摩擦系数随载荷的增加而降低,这是因为实际接触面积 A_r 比载荷 N 增加的慢。对于非金属材料,情况较为复杂,需要根据不同的材料用实验确定。

表面粗糙度及纹理方向对摩擦系数的影响

摩擦副在塑性接触下,其干摩擦系数是一定值,即不受粗糙度的影响。这是因为此时粗糙度对实际接触面积无多大影响。而在弹性或弹塑性接触情况下,干摩擦系数随表面粗糙度的降低而增加,因为表面粗糙度低,实际接触面积增大,因而表面分子引力增大。

应该指出,表面粗糙度降低时,摩擦系数降低,当进一步降低粗糙度时,则摩擦系数升高,期间粗糙度有一个临界值,此时摩擦系数的值最小。

但如果在摩擦对偶间加上润滑油,使之处于混合摩擦状态,则随着粗糙度的降低,摩擦系数也降低,因为此时表面粗糙度越低,油膜的覆盖面积就越大。

为什么会产生摩擦

世界各国的科学家和技术人员经过 6 个多世纪的努力,对摩擦现象及其本质的研究取得了相对大的进展。但对产生摩擦的机理问题认识并不统一,即为什么会产生摩擦?

机械啮合学说

最早的研究者即阿孟顿等人,为了解释古典的摩擦定律成立的理由,认为摩擦产生的原因是表面粗糙的凹凸不平引起的。

当两固体表面发生接触时,凹凸嵌合,从而在两表面相对滑动时产生了阻碍两固体表面滑动的阻力。根据该理论,将摩擦表面加工光滑,消除那些凸起部分,就可以减少摩擦作用,而且表面越光滑,摩擦力应该越小。

我们用实验来验证，当表面变光滑的起始阶段摩擦力确实是减小了，这说明机械啮合理论对比较粗糙的表面产生摩擦的原因的解释可合理的。但继续实验，即在表面粗糙度降低到一定程度以后，随着粗糙度的进一步降低，摩擦力非但不减少，反而增加了。这说明该理论对非常光滑的表面是不适用的。

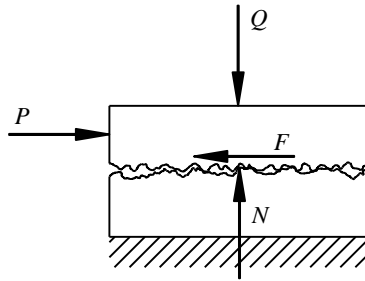


图 3.9 表面相互啮合，产生滑动摩擦

于是又出现了分子学说。

分子学说

分子学说简单的理解是由于摩擦表面很光滑，使接触面积增大，分子间的距离缩小，分子、原子吸引力增大所产生分子吸引力相互作用形成阻力的结果。那么什么是分子力呢？

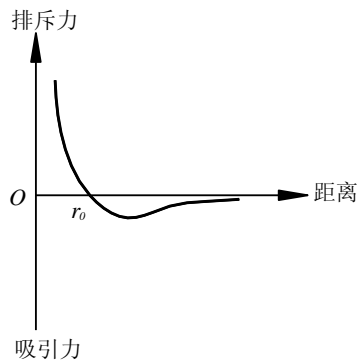


图 3.10 分子力的变化规律

分子力，又称分子间作用力、范得瓦耳斯力，是分子间的相互作用。以下的现象能说明分子间存在引力：①分子间虽然有间隙，大量分子却能聚集在一起形成固体或液体；②用力拉伸物体，物体内部要产生反抗拉伸的弹力；③两个物体能粘合在一起。同样，这些现象：①分子间有引力，却又有空隙，没有被紧紧吸在一起；②用力压缩物体，物体内部要产生反抗压缩的弹力，也能说明分子间存在斥力。分子力的变化是有规律的，如图 3.10 所示。

- 当 $r = r_0$ ($r_0 = 10^{-10}$ 米) 时，分子间的引力和斥力相平衡，分子力为零，此位置叫做平衡位置；
- 当 $r < r_0$ 时，分子间斥力大于引力，分子力表现为斥力；
- 当 $r > r_0$ 时，分子间引力大于斥力，分子力表现为引力；
- 当 $r \geq 10 r_0$ 时，分子间引力和斥力都十分微弱，分子力为零；
- 当 r 由 $r_0 \rightarrow \infty$ 时，分子力（引力）先增大后减小。

有了这些基本知识，我们就容易理解分子学说了。当两个物体表面经过精细加工后，变得非常光滑，当其互相接触时，接触面积增大，分子与分子间距离短，达到了分子吸引力的作用范围，分子间力表现为引力。

但同样，表面越粗糙，摩擦力也越大，该理论也解释不了。

分子机械理论

克拉盖尔斯基在对固体的摩擦进行了深入的研究后，把机械和分子两种学说统一，系统地提出了分子机械理论。该理论认为摩擦力是由两部分组成，其中一部分是凸峰机械啮合产生的，另一部分是真实接触面积上的分子吸引力。当表面很粗糙时，机械啮合的部分占主要成分，分子吸引力占次要成分，当表面非常光滑时，机械啮合部分占次要成分，分子吸引力占主要成分。

分子机械理论比较圆满地解释了滑动摩擦的成因，可用摩擦的二项式定律来进一步说明这个理论：

$$F = F_{\text{分子}} + F_{\text{机械}} = \alpha F_N + \beta A$$

α 、 β 分别为有摩擦表面机械性质（凹凸机械嵌合力）和物理性质（分子吸引力）所决定的系数。

摩擦的粘着理论

从 1938 年开始，鲍登就对固体的摩擦进行了深入细致的研究。1950 年鲍登正式提出了最新的摩擦理论——粘着理论。

粘着理论认为两块金属在法向压力作用下，一开始只有极少几个最高的凸峰互相接触，因此单位面积上的压力很大，这少数凸峰很快被压平，以后又有更多的凸峰进入接触，再被压平。……这种过程重复多次以后，因为更多的凸峰被压平，真实接触面积增大，单位面积上的压力减小，直到能承受法向压力，上述这种过程便会停止。此时材料也只是在那些被压平的凸峰处才发生接触，其余部分面积仍未接触，因此真实的接触面积比名义上的摩擦面积小得多。这个结论已经用测定电阻、导热性能等方法证实。粘着理论认为在那些被压平的凸峰处，产生了粘结点，两块材料在粘结点已经连接在一起，切向主动力只有将这些粘结点剪断，才能产生滑动，但滑动后又会有新的粘结点出现，摩擦过程就是粘着与剪断交替进行的过程，摩擦力就是金属粘结点抵抗剪断的力。

根据粘着理论的公式进行计算，对于大多数金属材料，摩擦系数约等于 0.2。这个数值与实验结果不符，相差甚大。实验测定很多金属材料在空气中的摩擦系数高于 0.5，在真空中就更高了。

为了使粘着理论符合实验结果，又提出了两种修正的粘着理论。第一种修正认为真实接触面积不仅和法向压力有关，由于切向力引起滑动，切向力也会影响真实接触面积。第二种修正认为未经处理的金属表面都不是真正的金属，而是一层自然污染膜，因此粘结点不是金属和金属粘在一起，而是隔着一层自然污染膜，因为自然污染膜比金属更容易被剪断，因而粘结点被剪断的不是金属而是自然污染膜。这便是在空气中（有污染膜存在）的摩擦力比在真空中净化后（没有污染膜存在）的小得多的理由。

粘着理论的最大弱点，是只能解释金属的摩擦现象，而不能解释那些不会发生粘着现象的材料，如砖瓦、石头、玻璃等，这些材料在压力作用下直到破碎也不能粘着。

从十五世纪文艺复兴时期，达芬奇对摩擦的研究开始，至今漫长的岁月里，一代一代的摩擦科学家致力于摩擦学的研究，硕果累累，我们就不一一详述了。摩擦的现象多种多样，成因千奇百怪，具体问题具体分析，针对不同的现象选择不同的理论来解释摩擦、认识摩擦、解决磨损问题。

滚动摩擦

大约 7000 多年前，人们就发明了雪橇利用滑动摩擦运送重物。从雪橇发展到轮式交通工具，从利用滑动摩擦到滚动摩擦，大约发生在公元前 3500 年，美索不达米亚（现属伊拉克）首先发明车轮。公元前 700 年亚述人用雪橇搬运大型石像时，显然意识到了滚动比滑动优越，他们故意把圆木放在雪橇下面充当了滚柱轴承的作用，加快了雪

橇的移动。

首先对滚动摩擦机理进行研究的当属英国物理学家罗伯特·虎克（1635~1703）。他认识到滚动摩擦的两要素：第一也是最重要的，地面屈服于车轮的重量，所以车轮向前滚动；第二，地面上的部分泥土会粘附于车轮之上。

滚动摩擦一般用阻力矩来量度，其力的大小与物体的性质、表面的形状以及滚动物体的重量有关。当一个物体在粗糙的平面上滚动时，如果不再受动力或动力矩作用，它的运动将会逐渐地慢下来，直到静止。这个过程，滚动的物体除了受到重力、弹力外，一般在接触部分受到静摩擦力。

为什么会产生滚动摩擦？我们先暂时不考虑那些明显可见的障碍物。我们先研究一个圆柱体在一个经过加工的平面上滚动的情况。此时的平面没有明显可见的障碍物存在，但事实上一切物体都不是刚体，它们在力的作用下都会产生变形，见图 3.11，表示一个圆柱压在支撑面上的变形情况。

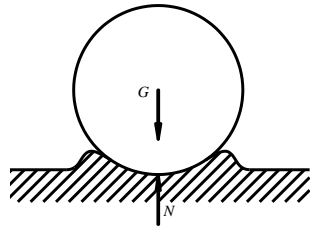


图 3.11 在法向压力的作用下，圆柱体和支撑面都会产生变形

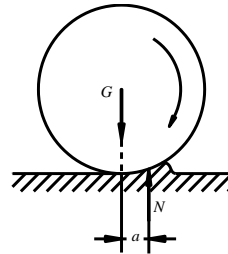


图 3.12 物体向前滚动，受到力矩 $N a$ 的阻碍

由于物体和平面接触处产生形变，物体受重力作用而陷入支承面，同时物体本身也受压缩而变形，当物体向前滚动时，接触处前方的支承面隆起，而使支承面作用于物体的合弹力 N 的作用点从最低点向前移（图 3.12）。正是这个弹力，相对于物体的质心产生一个阻碍物体滚动的力矩 $M=N a$ ，这就是滚动摩擦。

滚动物体在接触面上滚动或有滚动的趋势时，物体和接触面都会发生形变。其形变可以分为以下四种情况：

- 滚动物体是刚体，接触面发生形变。压路机的碾子在碾压泥土路基时，可简化为这类问题。
- 接触面为刚性，滚动物体产生形变。汽车、自行车的轮胎在水泥路面上行驶时，可简化为这类问题。
- 滚动物体和接触面均为刚性。这是理想情况，但是像火车钢轮在钢轨上的运动，可以简化为这类问题。
- 滚动物体和接触面均有形变。滚动物体和接触面都发生形变的情况最普遍，尽管这种情况很复杂，但是由于它介于第一、第二两种情况之间，可以根据“两边夹法则”进行处理。当滚动物体形变相对接触面较大时，可以把它简化为第一种情况；当接触面形变相对滚动物体较大时，可以把它简化为第二种情况。

另外，接触面的粗糙度，显然与变形起着同样的作用，支撑面越粗糙，滚动摩擦系数也越大。例如在碎石公路上推动一辆卡车，要 15 人才能推动，在铁路上推比卡车还重的车厢，只要两人就能推动了。这是因为碎石公路路面不平，汽车轮是充气的橡胶轮胎，容易变形，因此汽车在碎石公路上的滚动摩擦系数较大；而火车厢的车轮和钢轨均为钢制，不易变形，并且钢轨表面又很光滑，所以滚动摩擦系数很小，比汽车小得多。

滑动摩擦 vs 滚动摩擦

现在我们再进一步谈谈滑动摩擦和滚动摩擦。

拉雪橇的力超过最大静摩擦力时，雪橇就要移动位置，开始滑动。但是，只要你把拉雪橇的绳子一松，雪橇走不远就会停下来。这个原因我们已经知道了：在滑动时总有滑动摩擦力在起作用，这个力与运动的方向相反，并且阻止运动。那么这个力取决于什么呢？滑动摩擦力像静摩擦力一样，也取决于压力。

大家都知道，拉装得很重的雪橇要比拉空雪橇费劲得多。在这里库伦定律还是近似准确的：滑动面之间的压力大多少倍，滑动摩擦力也就大多少倍。

滑动摩擦力还取决于摩擦面的材料。冬天下雪后，小孩子们总喜欢在雪上用双脚滑动，他们都知道在冰上比在雪上要溜得远、省劲，在雪上要比在地上溜得远。

滑动摩擦和速度有什么关系呢？测量证明，在慢滑动时，滑动摩擦力通常比静摩擦力小。随着速度的增加，滑动摩擦力也就开始增加。在某一速度时，这个摩擦力将等于静摩擦力。如果速度再继续增加，滑动摩擦力就几乎不变。滑动摩擦力的平均值几乎等于最大静摩擦力（在其他条件相同的情况下）。

在运动刚开始、速度还很小时，滑动摩擦力一般比静摩擦力小。这就说明了一个很明显的事实，使静止的物体移动时，需要克服的是静摩擦力，而拉正在移动着的物体时，需要克服的是滑动摩擦力。

在桌子上放一只玻璃杯（不带棱的），推它一下，使杯底沿着桌面滑动。移动几厘米后，杯子就停了下来。现在把这个杯子躺倒横放在桌子上，再用同样的力推它一下。这可得小心点，杯子很容易滚到地上去！这是怎么回事呢？杯子的重量并没有改变，杯的侧壁和杯底也都是用同样的玻璃做的，桌子也还是那张桌子。整个关键就在于，现在杯子是滚动而不是滑动，阻止杯子运动的是滚动摩擦力，这个力比滑动摩擦力要小好多倍。

事实证明，在许多情况下，滑动摩擦要比滚动摩擦大 50 倍以上！

在其他方面，滚动摩擦和滑动摩擦是没有什么区别的。

为了开始滚动，同样需要克服最大静摩擦力。不过滚动时的静摩擦力比开始滑动前的静摩擦力要小得多。

滚动摩擦与速度的关系，要比滑动摩擦更小些：速度增加时，滚动摩擦力几乎不增加。增加运动物体上的压力时，滚动摩擦力虽然也增加，但比滑动摩擦力增加得慢些——它不服从库伦定律。滚动摩擦力的大小，也在很大程度上取决于摩擦材料。

是滚动好还是滑动好？把滚动和滑动比较一下，对这个问题的回答就很清楚了。当然，滚动要比滑动好。维持滚动所需的力要比维持以同样速度滑动所需的力小得多。因此在夏季乘车而不雪橇就很容易理解了。

那么为什么在冬天车轮要让位于雪橇呢？整个关键就在于，只有在车轮能够滚动的时候，车轮才比雪橇好。而要使车轮能够滚动，车轮下面必须是硬的、平的、同时还是不滑的道路。车轮在深雪上要陷下去，陷下去之后只能在雪里空打转而不能滚动。而在冰面上，由于摩擦力太小，容易打滑，不易前进，还比较危险。雪橇在雪面上比较能支持住，因为这时负荷是分布在雪橇很大的表面上，它下面的雪塌陷得浅。

特殊工作条件下的摩擦

现代的机械设备中，有很多是在特殊的工作条件下工作的，例如：太空飞船、人造地球卫星、核电站中的某些设备等。所谓的特殊工作条件通常是指真空、高速、高温、低温和腐蚀介质等工作条件。那么，在这种条件下发生的摩擦是不是也具有某些特殊性呢？

真空中的摩擦

真空根据真空度可以概略地分为中等真空（到 $1.33 \times 10^{-2} \text{Pa}$ ）和高真空（低于 $1.33 \times 10^{-3} \text{Pa}$ ）。

摩擦副在真空中与在大气中的工作情况大不相同,因为气体介质是决定摩擦区域内物理与化学过程的主要因素之一。

在空气中,摩擦表面上有氧化膜和气体吸附膜,这些保护膜可以阻止金属表面间的直接接触,从而避免产生摩擦表面间的粘着。在摩擦过程中,这些保护膜也会发生破裂,但它们还可以重新生成。在真空条件下,摩擦则有其特殊性。气体吸附膜遭到破坏,发生脱吸,原来的氧化膜也会破裂。因为真空中缺氧,金属表面几乎不产生氧化,因而氧化膜很难形成。物体的表面没有任何保护膜,非常洁净。所以在真空中,摩擦总是伴随着非常严重的粘着,从而引起摩擦表面的破坏,摩擦系数明显增大。

此外,摩擦副在真空中工作没有对流散热的条件,故摩擦表面的温度相当高。

高速下的滑动摩擦

当滑动速度达到每秒几十米、几百米、甚至上千米时,则称为高速滑动摩擦。在高速纺织机械、武器发射系统以及宇宙飞行器中,可以达到上述滑动速度范围。

在高速滑动时,摩擦表面之间的接触时间很短,金属表面在瞬间受到极强烈的摩擦热,表面温度急剧升高,该温度足以将金属表面熔化。结果在摩擦表面上形成极薄的熔化层,并产生氧化膜,此时摩擦力会急速降低。这是因为熔化层具有流体动力学的特性,它与氧化膜均有润滑作用。不管载荷有多大,当滑动速度很高时,摩擦系数将随着滑动速度增加而降低到 0.02~0.03。

高温下的摩擦

在燃气机、核电站和太空设备中,必须采用由耐热材料制造的摩擦副。

在高温摩擦条件下,不论摩擦副采用何种耐热材料,随着温度的变化其摩擦系数都存在一个最小值,即在开始阶段,摩擦系数随着温度的升高而降低。而当温度上升到某一数值后,摩擦系数又会逐渐增大。此外,当高温摩擦时,材料的物理化学性能都会发生变化,也会引起摩擦系数的变化。

在高温下,摩擦表面容易变形,表层熔化,摩擦表面之间产生热扩散,从而引起严重的粘着使表面遭到破坏。

总之,高温对材料摩擦特性的影响是相当复杂的,而改善高温下摩擦副的性能最有效的途径是研究开发高温润滑剂和耐热材料,如制造含有固体润滑剂(如二硫化钼 MoS_2 等)成分的耐热复合材料。

低温下的摩擦

低温可以分为 $0\sim-80^\circ\text{C}$ 、 $-80^\circ\text{C}\sim-196^\circ\text{C}$ 、 $-196^\circ\text{C}\sim-273^\circ\text{C}$ 三个等级。凡是在此温度范围内工作的摩擦副,其摩擦即称为低温下的摩擦。例如,低温液体(液氮、液氢和液氧等)输送泵的密封以及在低温下工作的轴承等零件均属这种摩擦。

很多材料在低温下会变脆,因而极易被破坏。所以对低温下工作的摩擦副来说,其材料的塑性是极为重要的一种性能,它对于摩擦副在低温下正常工作具有决定性的作用。

在低温摩擦时,如果冷却介质不同,其摩擦特性也不一样。比如说在非氧化性的流体中(如液氢、液氮),摩擦表面上不易形成氧化膜,故金属表面间容易产生粘着。而在液氧中则不易产生粘着,可能是因为摩擦表面形成了氧化膜的缘故。

腐蚀介质中的摩擦

在酸液、碱液和海水等腐蚀性流体中的摩擦称为腐蚀介质中的摩擦。

当摩擦副在腐蚀介质中摩擦时,由于吸附作用和电化学作用而在相对运动的摩擦表面上形成一层薄膜,这层膜对表面的摩擦特性影响很大。在腐蚀介质中工作的摩擦副应采用耐腐蚀材料。

铁棒磨成针

唐代大诗人李白,幼年时便读经书、史书,那些书都十分深奥,他一时读不懂,便觉枯

燥无味，于是他丢下书，逃学出去玩。

他一边闲游闲逛，一边东瞧西看。他看见一位老妈妈坐在磨刀石上的矮凳上，手里拿着一根粗大的铁棒子，在磨刀石上一下一下地磨着，神情专注，以至于李白在她跟前蹲下她都没有察觉。

李白不知道老妈妈在干什么，便好奇地问老妈妈在做什么。老妈妈回答在磨针。

“什么？”李白有些意想不到，他脱口又问道：“这么粗大的铁棒能磨成针吗？”

这时候，老妈妈才抬起头来，慈祥地望望小李白，说：“是的，铁棒子又粗又大，要把它磨成针是很困难的。可是我每天不停地磨呀磨，总有一天，我会把它磨成针的。孩子，只要功夫下得深，铁棒也能磨成针呀！”

幼年的李白是个个性很高的孩子，他听了老妈妈的话，一下子就明白了“做事情只要有恒心，天天坚持去做，什么事也能做成”的道理。于是他便回到家中，用功读书。



图 3.13 李白与“铁棒磨成针”

哲学家从这个故事中受到启发和教育，明白了一个道理“只要功夫深，铁棒磨成针”。而摩擦学家最感兴趣的是，磨损的作用是如此之大，不容小觑。磨损就是由于表面的相对运动而使物体工作面的物质不断损失的一种现象，铁棒在石头上不停地来回摩擦，逐渐变细，就是典型的磨损现象。

磨损是摩擦的孪生兄弟

在摩擦过程中，磨损总是同时存在着的，不过有时磨损量很小，我们一时难以察觉。我们穿的鞋与地面摩擦，每走一步都产生了磨损，但要想看出每走一步的磨损量有多大是困难的，但等穿过一个月，它的磨损痕迹就很明显了。同样袜子因为磨损经常穿洞。环顾四周，磨损随处可见。机器中有相对运动的零件，同样有磨损，典型的有如齿轮，在使用一段时间后，轮齿会变薄，齿间间隙会增大，以致失去传动精度而必须更换。

随着机器向高速方向发展，磨损问题就显得更加突出。机械工业中 50% 的原材料用来生产配件，这些配件都是机器中的易磨损零件，其中 80% 用于更换因磨损而失效的零件。可见磨损给人类带来了多大的负担，因此减少磨损具有巨大的意义，减少磨损就等于创造了新的财富。

事物都有其两面性，磨损也不都是令人面目可憎的。大理石经磨损抛光后才光鉴照人；“玉不琢不成器”，宝石玉器不进行衍磨作业，也不会闪闪发光；你家新买了一辆轿车，也要经过跑合，才能奔驰得更流畅久远；同样工厂新进的机器也需要经过跑合，使用寿命才会更长。这些都是有益的磨损现象。

磨损的三个阶段

要减少不必要的磨损，就必须先了解磨损的过程和原因，然后才能对症下药地采取措施。一部新机器开始工作后，它的各个运转部分就开始发生磨损，随着机器的运转，磨损不断增加，直到失效报废。这个过程可分为三个性质不同的阶段，见图 3.14。

第一个阶段是跑合阶段，这个阶段的时间不长，在这个阶段，新机器的摩擦面上那些加工留下来的凸峰很快被磨平，真实接触面积很快增大，磨损速度很快减小，机器随即进入稳定磨损阶段。新机器在开始使用时，必须让机器无载荷运转一段时间度过跑合阶段。由于在这个阶段中那些被磨掉的粉末状的材料存留在润滑油中，会起到磨料的作用，使磨损加剧，因此在跑合阶段完成后，应彻底地更换一次润滑油。

第二阶段是稳定磨损阶段，这个阶段磨损速度很慢，并且很稳定，这是一个较长的阶段，这阶段的时间，就是机器零件的耐磨寿命。机器在这阶段仍然存在磨损，仅仅是磨损速度较小而已，但长期工作，终会是磨损量积累到一个较大的程度。例如滑动轴承经过长期运转，孔会变大，并且变得不圆，而轴颈则会变细，这就导致孔和轴之间的间隙过大而丧失配合精度，这时磨损开始进入第三个阶段。

第三个阶段叫剧烈磨损阶段，这个阶段的时间不长。由于机器运转部分精度已经丧失，润滑条件恶化，因此机器将产生异常的噪音，并且产生过大的振动，摩擦部分温度升高，而这一系列现象又反过来加快磨损，导致恶性循环，使机器中参加摩擦的零件很快磨坏，最后完全丧失工作性能，不得不更换零件。

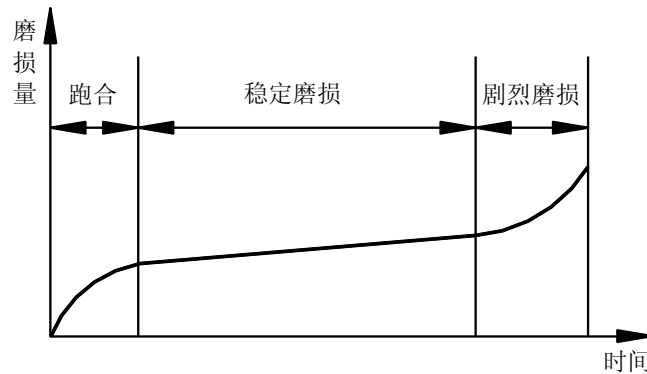


图 3.14 机器零件磨损的三个阶段

千奇百怪的成因

假如你认为磨损都是像铁棒与石头互相摩擦那样产生的，那就不对了。磨损的成因很复杂，并且不只一种。

第一种磨损叫粘着磨损。

根据粘着摩擦理论，在摩擦时接触点产生塑性变形，两表面会粘着，形成粘结点，在产生滑动后，这些粘结点被撕开，然后又第二次粘着，再撕开，……。这种循环过程，形成了粘着磨损（图 3.15）。轻微的粘着磨损，些微材料从一个表面转移到另一个表面；较重时，软金属会涂抹到与其摩擦的硬金属面上；更严重时，会发生擦伤或撕脱，此时摩擦面上会留下划痕；最严重时会发生咬死，不能再作相对运动。

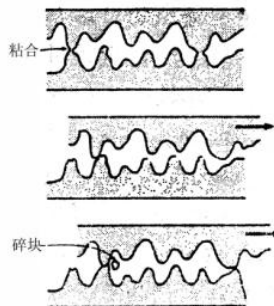


图 3.15 粘着磨损示意图

第二种磨损叫磨料磨损。

磨料是指研磨工艺中所使用的极硬的颗粒状物。例如在玻璃上加上水和石英砂，然后用砂轮压在石英砂摩擦，就可以磨去玻璃表面的一层，使玻璃变成半透明的毛玻璃。

磨料磨损，就是硬的颗粒或硬的突出物，在摩擦过程中引起材料的脱落（图 3.16）。这种磨损在工业中是最常见的，也是最严重的一种磨损形式，例如，在农业机械、矿山机械、工程机械和运输机械中进行作业的零件的磨损主要是磨料磨损，例如：挖掘机和冲击式破碎机的锤头、犁铧、耙齿、运输机槽板、轧碎机的滚筒、球磨机的衬板与钢球等（图 3.17）。在这些机械中的一些零件，与泥沙、矿石或灰渣直接接触，或是硬的砂粒进入了摩擦面，或是由汽或水带动的颗粒与零件相摩擦，都会造成磨料磨损。

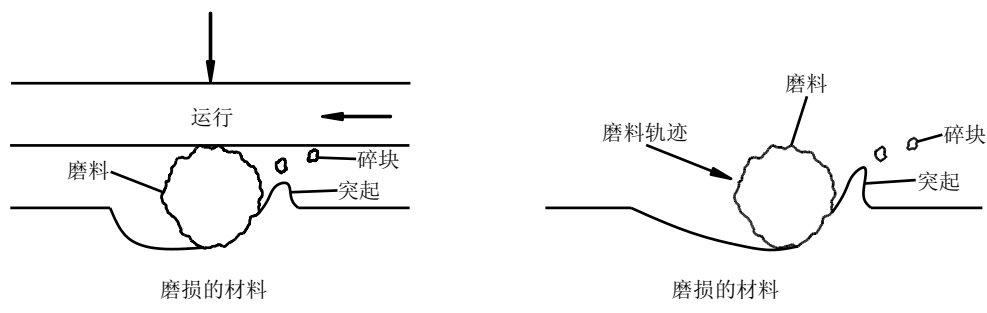


图 3.16 磨料磨损示意图



图 3.17 铁锹的磨料磨损

据统计，磨损在工业范围内造成的损失其中磨料磨损就占了 50%。磨料磨损之所以如此普遍，是因为潜在的磨料物质到处都是，例如二氧化硅、氧化铝和氧化铁等约占地球外壳的 81%，绝大部分机械设备是在含有大量各种尘埃的空气介质中工作的，来自外界的这些异物微粒一旦进入摩擦副，即造成磨料磨损。此外，切屑以及各种磨损的产物大半都是磨料，它们也可以引起磨料磨损，但是磨料的主要来源还是空气中的灰尘。

第三种磨损叫表面疲劳磨损。

表面疲劳磨损是由于交变应力效应，使摩擦表面反复产生变形，造成累积损伤而导致疲劳裂纹的生成和扩展，最后使表面分离出粒状或片状磨屑，并留下痘斑状凹坑的一种特殊的破坏形式（图 3.18 和图 3.19）。

如机器中的滚珠，对于滚珠表面某一点讲，某一时刻它与轴承圈接触，受到压力作用，但很快此点便转过去了，压力也便没有了，但过一些时间该点又会被压，总是这样循环重复着。滚珠表面上任何一点，都处于上述状态。在这种循环变化的压力下，滚珠表层会剥落，轻微时造成微小麻点，严重时麻点连成一片。如果你修理过自行车，有时会发现滚珠表面就

有上述这种磨损的痕迹。



图 3.18 球磨机小齿轮根部的初期点蚀

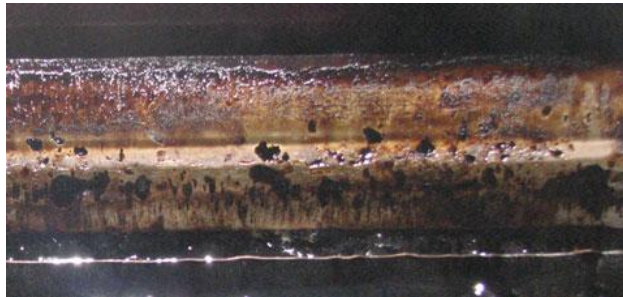


图 3.19 球磨机小齿轮的扩展性点蚀

最后一种磨损是腐蚀磨损。

这时零件表面与接触的介质发生化学或电化学反应，生成的化合物被剥落造成磨损。例如钢铁与空气接触表面会生成氧化铁，各种化工设备中的零件与酸、碱、盐接触会生成化合物，这些氧化物或其它化合物在摩擦中很容易剥落，造成腐蚀磨损。腐蚀磨损中还有一种气蚀磨损，例如水泵在工作时，会带入一些空气，在水中形成气泡，这些气泡在高压区域破碎时会产生冲击力，破坏水泵零件的表面，生成表面麻点或海绵状孔穴，严重时孔穴可深达 20 毫米。轮船的螺旋桨也会产生这种磨损。

透过现象看本质—当代的磨损理论

奇怪的是，人们对于磨损的研究起步很晚，直至二十世纪中期成果还是很少。随着现代分析方法的进步和成熟，对于磨损的研究才有了实质性的进展。磨损定律在数量和简单性上其与摩擦定律类似：①材料的体积磨损量与滑动距离成正比；②材料的体积磨损量与法向载荷成正比；③材料的体积磨损量与较软材料的屈服极限或硬度成反比。

磨屑是在摩擦过程中从表面上脱落下来的材料。要真正了解磨损的过程，并进一步研究产生磨损的原因，就必须了解磨屑的形成过程；它们的大小、形状和机械性能等与磨损的过程和状态究竟有什么关系。为此，人们首先通过扫描电子显微镜等现代化仪器观察磨屑，发现磨屑的形状各异，有片状的、卷曲状的、球状的甚至还有类似贝壳状的。此外，还研究了磨屑的显微硬度、相组成和组织。在此基础上，人们提出了各种各样的新理论。有剥层理论、疲劳理论、分子理论以及热波动强度理论等等。

磨损的剥层理论

该理论是美国麻省理工学院的苏教授（N.P.Suh）在 1937 年建立的。主要叙述了薄而长的片状磨屑的形成过程：

- 当互相接触的两表面滑动时，在接触点上产生粘着，划出犁沟。较软表面上的微凸体容易产生塑性变形或被磨掉，就形成了比较光滑的表面。此时，就变成了硬的凸

峰与较软的平面的接触，于是凸峰就在平面上犁沟，如此循环变形和磨损。

- 当亚表层继续变形时，便会形成裂纹和空穴，形成裂纹的深度与材料的性能和载荷有关。
- 当继续施加载荷时，金属会产生进一步的塑性剪切变形，而使裂纹之间以及裂纹与空穴之间相互连接与汇合，于是裂纹变大变长，直至裂纹与表面之间的材料断开，因而形成了薄而长的磨损碎片。

磨损的疲劳理论

前苏联的克拉盖斯基是提出疲劳理论的最早的学者。他的理论认为：

- 由于实际表面存在着粗糙度，当两表面相互作用时，其接触是不连续的，各接触点之和组成了实际接触面积；
- 两表面在法向力的作用下，实际接触点上便会产生局部应力和局部变形；
- 当两表面产生相对滑动时，由于摩擦力的作用，接触区表面材料的性能将发生变化；与此同时，表层材料的固定体积会受到交变应力的多次重复作用，因而使之受到累积损伤，产生疲劳裂纹，最后裂纹扩展，汇合形成磨屑而脱落。

研究摩擦磨损的方法

工具

工欲善其事必先利其器，研究摩擦磨损的工具就是各种摩擦磨损试验机，选择合适的设备我们就能检测出摩擦过程中的摩擦系数及磨损量（或磨损率）。试验的目的在于研究各种因素对摩擦磨损的影响，从而合理地选择配对材料，采用有效措施降低摩擦、磨损，正确设计摩擦副的结构尺寸及冷却设施等等。

摩擦磨损试验大体上可分为实验室试验、模拟试验或台架试验，以及使用试验或全尺寸试验三个层次。各层次试验设备的要求各不相同。

- 实验室评价设备

实验室设备主要用于摩擦磨损的基础研究，研究载荷、速度等工作参数对摩擦磨损的影响。还可以控制试验环境，如所加润滑剂的种类、剂量及润滑方式，周围气氛（惰性气氛、真空、温度、特殊介质），以求得特定环境条件下的结果。

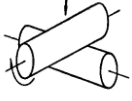
试验设备有各种不同的摩擦形式、接触形式和运动形式，有不同的主变参数（载荷、速度）和可测结果（摩擦系数、磨损）。摩擦形式：滑动摩擦、滚动摩擦及滚动-滑动混合摩擦；接触形式：点接触、线接触和面接触；运动形式：旋转运动和直线运动，又各自有单向和往复两种形式。

将这些形式排列组合成不同的试验设备。研究者要根据自己的需求选择合适的试验设备和试验条件。常用的实验室摩擦试验设备见表 3.1。

表3.1 实验室常用的摩擦试验设备

| 摩擦副对偶 | 试验机名称 | 接触及运动形式 | 可测数据 | 应用范围 |
|---|-------------|----------------------|-----------------------------|------------------------------|
|  | 四球机 | 点接触 滑动摩擦 旋转运动 | 测量不同载荷与速度下球的磨损，磨斑直径和Pb, Pd值 | 适合于评定润滑油、脂、膏的润滑性及抗磨性 |
|  | 各种类型的环-块试验机 | 线接触 滑动摩擦 旋转或摆动 | 测量不同载荷与速度下的动摩擦系数和磨痕宽度 | 液体及半固体润滑剂 固体润滑材料 干膜润滑剂 |

| | | | | |
|---|--|--|---|--------------------------|
| | Skoga磨损试验机 | 线接触 滑动摩擦 旋转 | 测定材料在有润滑和无润滑下的磨损 | 各类固体材料 液体润滑剂 |
|  | Falex-0试验机 | 线接触（4线） 滑动摩擦 旋转 | 在固定速度下改变载荷，测定承载能力和耐磨寿命 | 液体润滑剂 固体润滑膜 |
|  | A-6型高温试验机 | 线接触（2线） 滑动摩擦 旋转 | 高温下固体材料的摩擦系数，磨痕宽度环境和试样温度 | 固体润滑材料 |
|  | 各种类型的栓-盘试验机 真空试验机 高温试验机 Falex-6型（有多种接触形式） | 点接触或面接触 滑动摩擦 旋转 | 在不同载荷与速度下测定材料的摩擦系数和耐磨性（磨痕深度，线磨损量，质量损失）及环境（真空度或温度） | 固体材料 固体膜 |
|  | 粘滑试验机 静摩擦试验机： | 点接触 滑动摩擦 直线或往复 | 在极低的速度下测定材料的静摩擦系数和动摩擦系数（粘滑现象） | 固体膜 固体材料 液体或半固体润滑剂 |
|  | 往复试验机， | 面接触 滑动摩擦 往复直线运动 | 在不同载荷与速度下测定摩擦系数和耐磨性 | 液体润滑剂和固体润滑材料、固体润滑膜 |
|  | 微动摩擦试验机 摩擦副： 面对面接触 圆柱对面线接触 球对面点接触 | 点、面、线接触 滑动摩擦 往复直线运动 | 在高速往复滑动下测定摩擦系数和磨损 | 液体润滑剂， 固体膜， 固体润滑材料 |
|  | 滚滑类试验机 | $n_1=n_2$ 为纯滚动 $n_1=0$ 为纯滑动 $n_1 \neq n_2$ 为滚滑 线接触（纯滚或滚滑），面接触（纯滑） 旋转运动 | 摩擦力矩 磨损 | 固体膜 固体润滑材料 液体润滑剂 |
|  | 轴承PV值试验机 | 面接触 滑动摩擦 旋转 | 极限PV值 温升 | 液体润滑剂 固体润滑材料 固体膜 |

| | | | | |
|---|---------|----------------------|------|--|
|  | 交叉圆柱试验机 | 点接触 滑（滚）动摩擦 旋转 | 摩擦系数 | |
|---|---------|----------------------|------|--|

● 模拟试验或台架试验设备

模拟试验或台架试验设备是专门设计的，可以模拟实际工况。台架试验的目的，通常是评定被试摩擦副的性能，能否达到规定的指标，如温升、使用寿命、功率消耗等。

经实验室筛选试验后，将候选材料做成的零件与实际摩擦副的几何结构相似，接触形式相同，在工况条件、环境条件相同或更苛刻的情况下进行试验。这种实验结果，能比较精确地反映出摩擦副的摩擦磨损的过程。模拟试验设备通常是根据需要自行设计的非标准设备，只有少数设备为通用的台架。

● 使用试验（全尺寸试验）

用实际部件甚至整机在实际工况条件及环境下进行试验，考查全部参量对整个摩擦磨损润滑系统综合作用的结果。但这种实验结果很难判断单一因素在整个运转过程中的影响程度，也不容易分析造成磨损失效的根本原因。这种实验的目的是确认系统运转的可靠性。通常这种试验是十分昂贵的，只有非常重要的部件才做全尺寸试验。

不可忽视的磨屑

磨屑不是垃圾。磨屑的形状、大小及数量，磨屑的成分和组织，常常可以作为推断曾经发生过的磨损过程和判断磨损严重程度的依据。

一般金属摩擦副在磨合阶段从表面上脱落下来的磨屑，通常其组分为氧化物，大小和表面微凸体相近。说明在磨合阶段，较高的微凸体顶端被迅速碾平，使承载面积增大。同时表面材料在磨合过程中被加工硬化，使磨损转入平缓的稳态阶段。

摩擦过程中常随着载荷和速度的变化以及温升的影响，磨损机理发生转化。从各阶段的磨屑组分（如 Fe 屑、Fe₂O₃ 或 Fe₃O₄ 屑）就可以证明这种转化过程。

磨屑的形状也是判断磨损机理的证据之一。如粘着磨损的开始阶段，磨屑为半球形。薄片形磨屑证明了苏的脱层理论。在滚动摩擦中，如球状磨屑增多则预示着将出现灾难性失效。细丝状的磨屑（犹如切削过程中形成的切屑），这种磨屑一般是由磨料磨损的微切削过程产生的。

但是，也不能凭磨屑这个单一的特征来确证磨损机理。因为磨损机理还与材料配对、润滑状况、环境条件等因素有关。

磨屑的检测工具，常用的有光学显微镜，扫描电子显微镜（SEM），透射电镜（TEM）等，可检测其形状和尺寸。对油样的光谱分析可检测润滑油中磨屑的数量和组分。X 射线荧光分析（RFA），发射光谱分析（ES），X 射线衍射技术等可用于检测少量磨屑的金属元素含量。用放射性同位素示踪技术检测磨损量的精度极高。并可做到不停机条件下随时提供磨损发展的信息。

雁过留声之磨痕

发生磨损后的表面，同样有着磨损机理、磨损严重程度及其发展过程的记载。磨损前后的表面状态、晶体结构、化学组成与原子状态都发生了很多变化。从其变化中可以找出摩擦过程中发生了些什么。所以检测表面是摩擦学研究的重要内容。

首先可用各种表面形貌仪，包括触针式测量仪，电子探针，接触式表面轮廓仪（含模拟计算和数字计算），超精表面形貌仪，扫描探针显微镜（原子力显微镜）等等，来放大成像观察磨损后的表面状态，比如几何形貌及粗糙度等。

其次就是借助于各种表面分析谱仪，检测样品表面产生的电子、离子、中子、光子等四

种粒子的信息。这些仪器通过表面各种发射谱来分析表面成分，用的基本激发源，有电子、离子、光子、中子、热场、电场、磁场和声波等八种。

根据上述摩擦磨损试验以及对磨屑和磨痕表面的检测结果，就可以评定摩擦磨损引起的设备工作能力的衰减程度，以预估其可能继续正常工作的寿命，及时组织维修或提出预警；可以对润滑材料的减摩抗磨性能进行评价，这对于发展新型润滑材料具有重大意义；对于重要的大型设备进行磨损监控，能及时准确地了解磨损发展的程度和发生磨损的部位，避免发生重大设备故障；可以在摩擦系统设计阶段预先考虑各种因素的影响，预估磨损发展情况和耐磨寿命，对于整个系统的设计具有重大的实际意义。

降低磨损的方法

磨损给人类带来的损失是相当大的，因此人类总是想办法减少磨损，降低磨损速度以延长机器的寿命，几个世纪以来人们致力于这方面的研究，想了很多方法。

第一，合理地选择摩擦零件的材料，并研制耐磨材料。以粘着磨损为主时，应当选用互溶性小的材料。假如是以磨料磨损为主，则应该选硬度高的材料或设法提高所选材料的硬度。如果是疲劳磨损为主，则选用不含非金属夹杂物的优质钢材。此外，还应大力开展各种耐磨材料的研制工作，以适应现代科技对新型耐磨材料的需求。使用耐磨材料，可以使零件的磨损速度降低，使零件的寿命延长。例如先进的碳/碳复合刹车片、传动用的橡胶带、耐磨粒磨损用的合金铸铁、耐冲击磨损的高锰钢等。

第二，润滑。润滑可以减小摩擦力，同时也可以减小磨损。为此，要根据不同的工作条件正确地选用润滑剂。同时应加速开发研制性能优良的润滑剂，并设计出可靠性高、能满足使用要求的润滑系统。

第三，采用先进的表面处理技术，提高零件表面耐磨性能。

另外，合理的结构设计可以减少磨损，零件的加工和装配质量对磨损的影响也是不容忽视的。最后还要对机器进行正确的使用，定时维修和保养。比如说，新机器使用前的正确“磨合”可以延长机器的使用寿命。经常检查润滑系统的油压、油面和密封情况，对轴承等部位定期润滑，润滑油和滤油器芯的定期更换，以阻止外来磨料的进入，以及定期进行维修等等。所有这些方面对减少磨损都是至关重要的。

以上都是实践经验的总结，有过无数成功的案例。随着现代机械的运行工况越来越苛刻、条件越来越复杂以及不断提升的高精度、高可靠性和长寿命方面的要求，也促使人们不能停滞研究摩擦磨损的脚步，要发展突破原有润滑材料性能极限的高性能润滑材料和表面技术，以适应现代机械运行的各种工况和发展需求，做到科学技术服务于生活和生产，节约资源和能源，实现可持续发展。