

机械的特点是其各机构的构件之间通过有序的运动和动力传递来实现工作要求。因此，它的各个零部件之间由于力的作用和相对运动就会产生摩擦和磨损。润滑则是降低摩擦和减少磨损的最有效和最常用的方法。

1.4.1

摩擦

可根据以下标准对摩擦进行分类。

1. 按摩擦副运动状态分

静摩擦：两物体表面产生接触，有相对运动趋势但尚未产生相对运动时的摩擦。

动摩擦：两相对运动表面之间的摩擦。

2. 按相对运动的位移特征分

滑动摩擦：两接触物体接触点具有不同速度和（或）方向（即具有相对滑动或有相对滑动的趋势）时的摩擦。

滚动摩擦：两接触物体接触点的速度的大小和方向相同（即具有相对滚动或有相对滚动趋势）时的摩擦。

自旋摩擦：两接触物体环绕其接触点处的公法线相对旋转时的摩擦。

上述摩擦方式（即运动方式）的叠加，就构成了复合方式的摩擦，如滑动滚动摩擦。

3. 按表面润滑状态分

干摩擦：两摩擦表面之间既无润滑剂又无湿气的摩擦，如图 1（a）所示。在工程实际中，并不存在真正的干摩擦，因为在任何零件的表面上，不仅会因为氧化而形成氧化膜，而且会被润滑油污染而形成脏污膜，因此它们的摩擦系数要比真空下测定的纯净金属表面的摩擦系数小得多。在机械设计中，通常把人们无意加以润滑而又无明显润滑现象的摩擦当作干摩擦处理。

干摩擦的摩擦阻力最大，摩擦最严重，零件使用寿命最短。

边界摩擦（即边界润滑）：具有边界膜隔开相对运动表面时的摩擦，如图 1（b）所示。边界膜有两类：吸附膜和化学反应膜，后者强度比前者高。化学反应膜是在润滑油中加入硫、磷、氯等元素的化合物（添加剂）与金属表面进行化学反应而生成的膜，这种膜熔点高、剪切强度低，适用于重载、高速和高温的摩擦副。

合理选择摩擦副材料和润滑剂、降低表面粗糙度、在润滑剂中加入添加剂，能提高边界膜的强度。

流体摩擦（即流体润滑）：以流体层隔开相对运动表面时的摩擦，即由流体的黏性阻力或流变阻力引起的摩擦，如图 1（c）所示。流体摩擦的摩擦阻力小，没有磨损，使用寿命长，是理想的摩擦状态，但必须在一定工况下才能存在。

混合摩擦（即混合润滑）：半干摩擦和半流体摩擦的统称，如图 1（d）所示。在这种状态下，摩擦副仍有磨损存在，但摩擦系数比边界摩擦小得多。

半干摩擦：边界摩擦和干摩擦同时发生的摩擦。

半流体摩擦：流体摩擦和边界摩擦，或流体摩擦和干摩擦同时发生的摩擦。

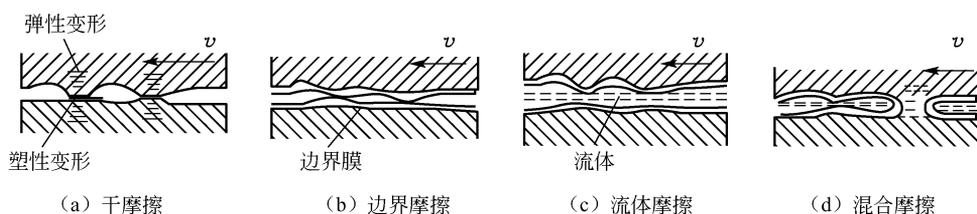


图 1 摩擦的种类

1.4.2

磨损

磨损的表现：松脱的细小颗粒（磨屑）的出现，以及受摩擦表面材料的性质（化学的、物理的、金相组织的、机械工艺的）和形状（形状、尺寸、粗糙度、表面层厚度）的变化。

由磨损引起的材料损失的量称为磨损量，它的倒数称为耐磨性。对于耐磨性，常常有人把它看作材料的固有性质——“耐磨强度”，这是一种误解。作为材料固有性质的“耐磨强度”是不存在的。磨损或耐磨性是与很多因素有关的系统特性。对磨损过程进行系统分析才是科学的研究和处理磨损问题的方法。

机械零件的磨损过程：机械零件的磨损过程通常经历不同的磨损阶段，直至失效。一般机器的磨损过程分为三个阶段：跑合磨损，一个零件加工后，由于表面存在不平度，在运动的初期接触面积小、接触应力大，因此磨损速度快，如果设计合理、润滑良好，随着跑合的进行磨损速度趋向稳定；稳定磨损阶段，磨损以平稳而缓慢的速度进行，标志磨损条件保持相对稳定，这是零件整个寿命范围内的工作过程；剧烈磨损阶段，经过稳定磨损阶段，零件表面失效或运动副间隙增大，使正常工作条件破坏，引起动载荷，出现冲击振动，温升加大，磨损速度加快。

磨损的主要类型：根据磨损机理不同，磨损主要有黏着磨损、磨粒磨损、疲劳磨损和腐蚀磨损四种基本类型。磨损常以复合形式存在。

1. 黏着磨损

当摩擦表面的微凸体在相互作用的各点处发生“冷焊”后，由于相对滑动，产生材料从一个表面转移到另一个表面的现象，即这种由于两表面黏着作用而引起的磨损，称为黏着磨损。

黏着磨损一般有轻微磨损、涂抹、擦伤、撕脱、咬死等形式。例如，气缸套与活塞环；曲轴与轴瓦；轮齿啮合表面及滚动轴承中钢球与滚道间皆可能出现黏着程度不同的磨损。涂抹、擦伤、撕脱通常称为胶合。黏着磨损是高速重载接触的常见破坏形式。

2. 磨粒磨损

由摩擦表面上的硬质突出物或从外部进入摩擦表面的游离硬质颗粒在切削或刮擦过程中，引起零件表面材料脱落的现象称为磨粒磨损。

磨粒磨损是一种最常见的磨损形式，如工程机械、农业机械、铁路机车、交通车辆中许多部件皆是磨粒磨损，占整个工业范围内总磨损的 50%，因而减少磨粒磨损有着重要的经济意义。

3. 疲劳磨损

由于交变应力使表面材料疲劳而产生物质的转移现象，称为疲劳磨损，也称接触疲劳或点蚀。

4. 腐蚀磨损

在摩擦过程中，与周围介质发生化学或电化学反应而产生物质损失的现象，称为腐蚀磨损。

腐蚀磨损分为氧化磨损、特殊介质腐蚀磨损、气蚀磨损等类型，分别发生在钢铁类零件、化工管道、泵类零件、水轮机转轮、柴油机缸套及船用螺旋桨等零部件上（详情可见相关资料）。

1.4.3

润滑

润滑是减少摩擦、磨损所造成的能量和材料损耗的最重要手段。为了控制摩擦与磨损，在摩擦副间加入某种物质，使其摩擦阻力降低，这种措施称为润滑。这些被加入用以降低摩擦阻力的介质称为润滑剂。

1. 润滑剂

(1) 润滑剂的作用。润滑剂的主要作用是降低摩擦、减轻磨损、保护零件不遭受锈蚀。当采用循环润滑时还能起到散热、降温的作用。此外，润滑剂还有防锈、传递动力、清除污物、减振、密封等作用。

(2) 润滑剂的种类。工程中使用的润滑剂主要有以下四种基本类型。

① 液体润滑剂，如矿物油、合成润滑油、有机润滑剂、水及液态金属等。矿物油是石油制品，品种多，挥发性好，惰性好，防腐性强，价格便宜，应用最广。合成润滑油是针对某些特定需要制定的，使用面窄且费用极高，故应用甚少。动物油和植物油是最早使用的润滑油，油性好但容易变质，常作添加剂使用。

② 半固体润滑剂，如润滑脂，是在液态润滑剂中加入稠化剂而成的。稠化剂多是金属皂类，也有非皂类，如石墨、二硫化钼、硅石粉等。此外，常加入一些添加剂，以增加抗氧化能力及油膜强度。润滑脂常用于在低速下工作、受冲击载荷或间歇运动零件的润滑。

③ 固体润滑剂是在摩擦表面加入固体粉末代替流体膜来润滑。固体润滑剂包括无机化合物、有机化合物和金属等。无机化合物有石墨、二硫化钼等，它们的稳定性好。有机化合物有金属皂、动物蜡、油脂等。软金属有铅、锡、铟等。固体润滑剂可用于极高负荷和极低速度工况，使用温度范围广，但润滑膜不易保持。

④ 气体润滑剂，如氮气、氦气及一些惰性气体等。

在一般情况下，可用润滑油或润滑脂作为各种机械设备的润滑剂。

(3) 润滑剂的性能。液体润滑剂的主要性能指标有黏度、凝点、闪点、油性等。润滑脂的性能指标有滴点和针入度。

① 黏度。黏度是润滑油最主要的性能指标，是选择润滑油的主要依据。它表示液体润滑油流动时内部摩擦阻力的大小，即可定性定义为润滑油的流动阻力。黏度越大，内摩擦阻力越大，液体流动性越差。油膜中黏性液体流动的动力黏度如图 2 所示。

黏度的大小可用动力黏度、运动黏度、条件黏度（恩氏黏度）等分别表示。

a. 动力黏度 η 。牛顿液体流动定律表明：在黏性液体中任何一点的切应力 τ 与剪切率

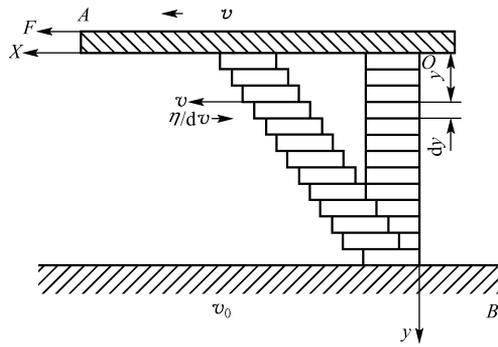


图2 油膜中黏性液体流动的动力黏度

dv/dy (即速度梯度) 成正比。即

$$\tau = -\eta \frac{dv}{dy} \quad (1)$$

式中 τ ——流体单位面积上的剪切阻力，即剪应力 (N)；

$\frac{dv}{dy}$ ——流体沿垂直运动方向的速度梯度；

η ——比例系数，称为液体的动力黏度。

式中“—”号表示 v 随 y 的增大而减小。

动力黏度的单位在国际单位制 (SI) 中为 $N \cdot s/m^2$ (即 $Pa \cdot s$)，它表示长、宽、高各为 1m 的液体，当上、下两平行平面发生 1m/s 的相对滑动速度需要的切向力为 1N 时，则该流体的黏度为 $1Pa \cdot s$ ，即 $1Pa \cdot s = 1N \cdot s/m^2$ 。

b. 运动黏度 ν ：动力黏度 η 与同温度下该液体密度 ρ 的比值。在国际单位制中，主单位为 m^2/s 。我国石油产品是用运动黏度 (单位为 mm^2/s) 标定的，常用润滑油的性质和用途见表 1。

表 1 常用润滑油的性质和用途

名称	黏度等级	运动黏度 (40°C) / (mm^2/s)	闪点 (开口) /°C 不低于	倾点/°C 不高于	主要用途
L-AN 全损耗 系统用油 (GB 443—1989)	5	4.14~5.06	80	-5	适用于对润滑油无特殊要求的全损耗润滑系统，不适用于循环润滑系统
	7	6.12~7.48	110		
	10	9.00~11.00	130		
	15	13.5~16.5	150	-5	
	22	19.8~24.2			
	32	28.8~35.2	160	-5	
	46	41.4~50.6			
	68	61.2~74.8			
	100	90.0~110	180	-5	
150	135~165				

续表

名称		黏度等级	运动黏度 (40°C) / (mm ² /s)	闪点 (开口) /°C 不低于	倾点/°C 不高于	主要用途
工业 闭式 齿轮油 (GB5903 —2011)	L-CKB 普通工业 齿轮油	100	90.0~110	180	-8	适用于齿面接 触、应力小于 500MPa 的中、 轻载荷的闭式直 齿轮、斜齿轮和 直齿锥齿轮装置
		150	135~165	200		
		220	198~242			
		320	288~352			
	L-CKC 中负载 工业 齿轮油	68	61.2~74.8	180	-9	适用于齿面接 触、应力小于 1.1GPa 的齿 轮 润 滑，如冶金、 矿山等工业用齿 轮装置
		100	90.0~110	200		
		150	135~165			
		220	198~242			
		320	288~352			
		460	414~506			
	680	612~748	-5			
	L-CKD 重负载 工业 齿轮油	68	61.2~74.8	180	-12	适用于齿面接 触、应力大于 1.1GPa 的齿 轮 及具有冲击载 荷 高 温或优良抗乳 化性能的齿 轮 装 置的润 滑，如石 油、冶金、煤 矿等引进设备 的齿 轮 装 置
		100	90.0~110	200	-9	
		150	135~165			
		220	198~242			
		320	288~352			
		460	414~506			
	680	612~748	-5			
	蜗轮蜗杆油 (SH/T 0094—1991)	220	198~242	180	-6	适用于滑动速 度大、铜—钢配 对的蜗杆传动 装置
320		288~352				
460		414~506				
680		612~748				
1000		900~1100				

c. 条件黏度：用条件数值表示的黏度，是采用特定黏度计（即恩氏黏度计）测定的。在规定温度下，从恩氏黏度计流出 200mL 样品油，所需秒数与同体积蒸馏水在 20°C 流出所需秒数的比值，以 $^{\circ}E_t$ 表示。规定温度一般是 20°C、50°C、100°C，因此常用 $^{\circ}E_{20}$ 、 $^{\circ}E_{50}$ 、 $^{\circ}E_{100}$ 表示。

② 凝点。润滑油冷却到不能自由流动时的最高温度，称为油的凝点。它是润滑油在低温下工作的一个重要指标，直接影响到机器在低温下的起动性能和磨损情况。低温润滑时，应选用凝点低的油。

③ 闪点和燃点。闪点是润滑油在火焰下闪烁时的最低温度。闪烁持续 5s 以上时的最低温度称为燃点。对在高温下工作的机器，应用闪点较高的润滑油，通常润滑油的闪点比

设备工作温度高 $30\sim 40^{\circ}\text{C}$ 。

④ 油性。油性是润滑油湿润或吸附于摩擦表面的性能。油性越好，吸附能力越强。对低速、重载或润滑不充分的场合，油性就具有极重要的意义。

⑤ 滴点。滴点表示润滑脂受热后从标准测量杯的孔口滴下第一滴时的温度，标志润滑脂耐高温的能力。润滑脂能够使用的工作温度应低于滴点 $20\sim 30^{\circ}\text{C}$ ，低于 $40\sim 60^{\circ}\text{C}$ 更好。

⑥ 针入度。针入度是表征润滑脂稀稠度的指标，重为 1.5N 的标准圆锥体在 5s 内沉入温度为 25°C 的润滑脂内的深度（以 0.1mm 计），即为其针入度。它表明润滑脂内阻力的大小和流动性的强弱。针入度越小，表示润滑脂越稠，承载能力强，密封性好，但摩擦阻力大，流动性差，不易充填较小摩擦间隙。

润滑剂的选用原则：重载、低速、高温、间隙大时，应选择黏度较大的润滑油；轻载、高速、低温、间隙小时应选黏度较小的润滑油。润滑脂主要用于速度低、载荷大、不经常加油、使用要求不高或灰尘较多的场合。气体、固体润滑剂主要用于高温、高压、防止污染等一般润滑剂不能适应的场合。对于润滑剂的具体选用，可参阅有关手册、资料，这里不再赘述。

2. 添加剂

普通润滑油和润滑脂用在十分恶劣的工作条件（如高温、低温、重载、真空等）下会很快劣化变质，失去润滑能力。为了改善润滑剂的性能，现代广泛采用的方法是在润滑剂中加入具有某种独特性能的物质，以适应某种特定需要。加入润滑剂中用以改善其性能的这些物质称为添加剂。

添加剂的种类很多，有油性添加剂、抗蚀添加剂、消泡添加剂、抗氧化添加剂、降凝剂、防锈剂等。由于使用添加剂是现代改善润滑功能的重要手段，因此其品种与产量皆发展很快。例如，在润滑油中加入 $0.25\%\sim 0.5\%$ 的抗氧化剂（硫磷化烯烃钙盐、油溶性酚醛、芳香胺等）即可达到防止润滑油氧化变质、腐蚀零件的目的。因此，可根据不同的工作条件及要求，参阅有关资料选择有相应添加剂的润滑油，以满足使用需要。