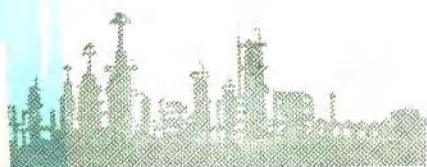


石油产品应用知识丛书

齿轮油

石油化工科学研究院编

26.3



石油工业出版社

石油产品应用知识丛书

齿 轮 油

石油化工科学研究院 编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书较全面和系统地介绍了汽车齿轮油和工业齿轮油。书中以近年来国内外发表的较新资料为依据,从理论到实际应用阐述了齿轮油的润滑机理,齿轮油的性质、组成、分类、规格、使用性能和试验方法,并对齿轮油的选择、使用和管理作了详细的阐述。

本书可供齿轮油的使用人员、供销人员和油品生产人员等阅读,也可供管理干部、技术人员和科研工作者参考。

本书系由石油化工科学研究院王薰陶同志执笔,阎邱颀钧、韩长宁、黄文轩、仇延生等同志审阅。

石油产品应用知识丛书

齿 轮 油

石油化工科学研究院编

*

石油工业出版社出版

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ 印张 $4^{5/8}$ 字数101千字印数1—7,500

1980年4月北京第1版 1980年4月北京第1次印刷

书号15037·2169 定价0.40元

目 录

第一章 齿轮和润滑	1
第一节 齿轮	1
第二节 齿轮润滑基本原理	4
第二章 齿轮油的性质	12
第一节 齿轮传动对齿轮油性质的基本要求	12
第二节 齿轮油的主要理化性质	13
第三节 对齿轮油要求的性质	21
第三章 齿轮油组成	28
第一节 基础油	28
第二节 添加剂	32
第四章 齿轮油分类、规格和性能	48
第一节 齿轮油分类和规格	48
第二节 齿轮油的使用性能	68
第五章 齿轮油试验	80
第一节 极压性能试验	80
第二节 齿轮油其他试验方法	92
第六章 齿轮油的选择	95
第一节 齿轮油品种选用	96
第二节 齿轮油粘度选择	102
第七章 齿轮油的使用和管理	109
第一节 齿轮的损伤和润滑	109
第二节 齿轮使用中的问题和处理	120
第三节 齿轮油的更换	124
附录一 国内外汽车齿轮油对照表	131
附录二 国内外工业齿轮油粘度分级对照表	133
附录三 国内外工业齿轮油对照表	134
参考文献	142

第一章 齿轮和润滑

第一节 齿 轮

一、齿轮传动的特点

齿轮传动是机械工程的一个重要组成部分。它研究旋转轴之间的动力和运动的传递。绝大多数的机械装置都需要作这种传递，而齿轮传动通常是完成这种传递的最好和最经济的方法。齿轮传动与其他传动（如皮带、链条和摩擦传动）相比有如下主要优点。

（1）能保证恒定的瞬时传动比，传递动力准确可靠。

（2）传动功率范围比较宽，可以从小功率到几万马力。经过磨合的齿轮传动圆周速度可达100米/秒。

（3）机械传动效率高，一般圆柱齿轮传动效率可达98%，而且使用寿命也较长。

（4）齿轮机构的结构紧凑，体积比较小。

二、齿轮的主要类型

按轴线的相互位置齿轮传动可分为三类：平行轴传动，相交轴传动和交错轴传动。每类传动中按齿轮和齿的形状不同有几种传动方式，如图1-1所示。

（1）直齿圆柱齿轮，两轴平行，是最普通的齿轮传动形式，传动中以滚动为主，高速时易产生震动和噪音。

（2）斜齿圆柱齿轮，两轴平行，齿长方向与齿轮轴线倾斜一角度，较直齿圆柱齿轮传动平稳，且传递功率大，但有轴向力。

（3）人字齿圆柱齿轮，具有斜齿轮特点，但无轴向力。

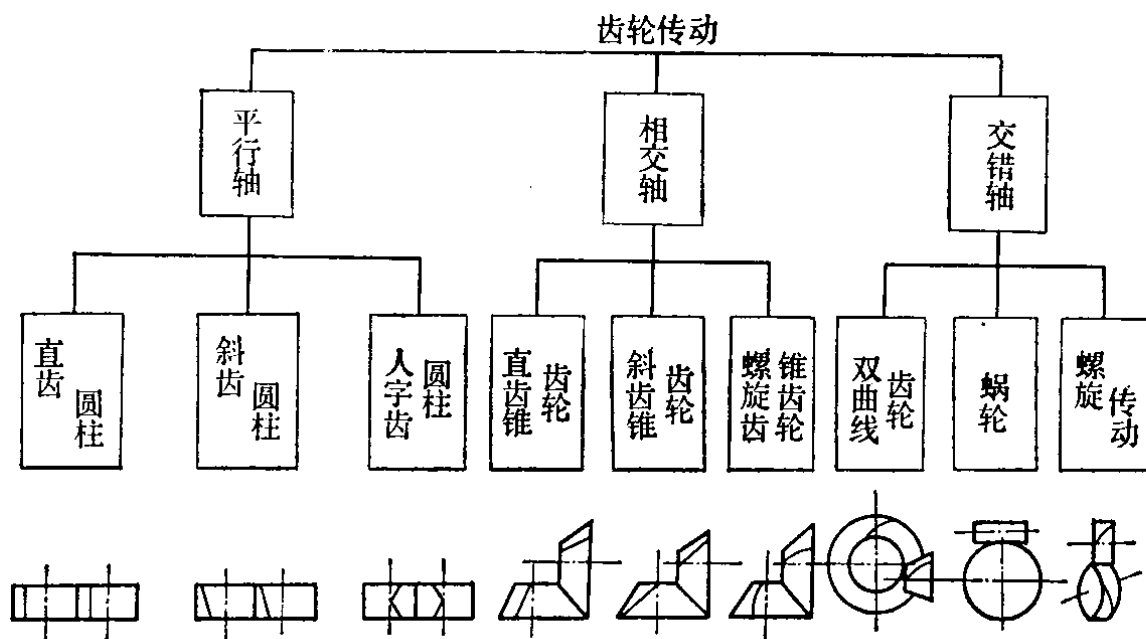


图 1-1 齿轮分类示意图

(4) 直齿锥齿轮，两轴线相交于锥顶点，轮齿啮合以滚动为主，在高速下易出现震动和噪音。

(5) 斜齿锥齿轮，较直齿锥齿轮传动平稳。

(6) 螺旋齿锥齿轮，两轴线相交，轮齿齿长方向为一弧线，传动平稳，传动功率大，适宜于高速传动。

(7) 双曲线齿轮，两锥齿轮轴线在空中交错，齿长方向仍为弧线，齿的弯曲强度和接触强度较高，传动平稳，传动功率大，适于高速，但滑动速度大，且接触应力大，故润滑条件苛刻，对润滑剂有较高的要求。

(8) 蜗轮传动，蜗轮和蜗杆轴线交错，传动比大，啮合以滑动为主，传动平稳，无噪音、无冲击、但效率低，因此对润滑剂要求较为苛刻。

(9) 螺旋传动，是指两个轴线不平行的螺旋齿圆柱齿轮的传动，滑动速度大，实际上，在工业动力传动中很少

采用。

此外按箱体结构型式分为开式齿 轮 箱 和 闭 式 齿 轮 箱 传动。

三、有关齿轮的基本尺寸和术语

现把本书将提到的有关齿轮的名 称 和 尺 寸，用图 1-2 示出。

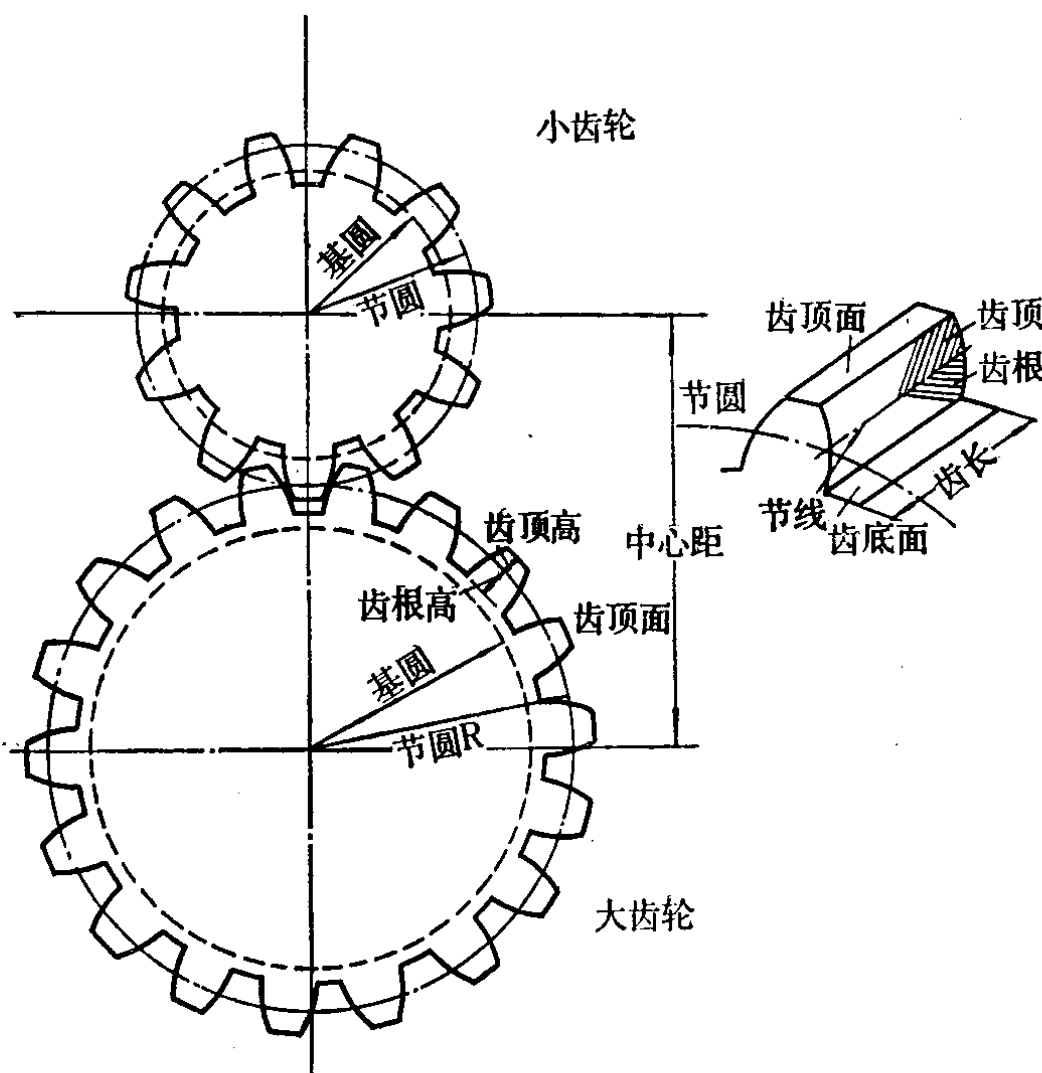


图 1-2 齿轮各部分的名称和尺寸

第二节 齿轮润滑基本原理

根据原理齿轮润滑可分为流体动力润滑（简称流体润滑）；弹性流体润滑；边界润滑和极压润滑。齿轮的接触特点是线接触，所以压力高，同时因有滚动接触，所以后三类润滑很重要。在实际齿轮中，也可能同时存在两种润滑状态，这种润滑叫混合润滑。

一、流体动力润滑

流体油膜的建立如图1-3所示。

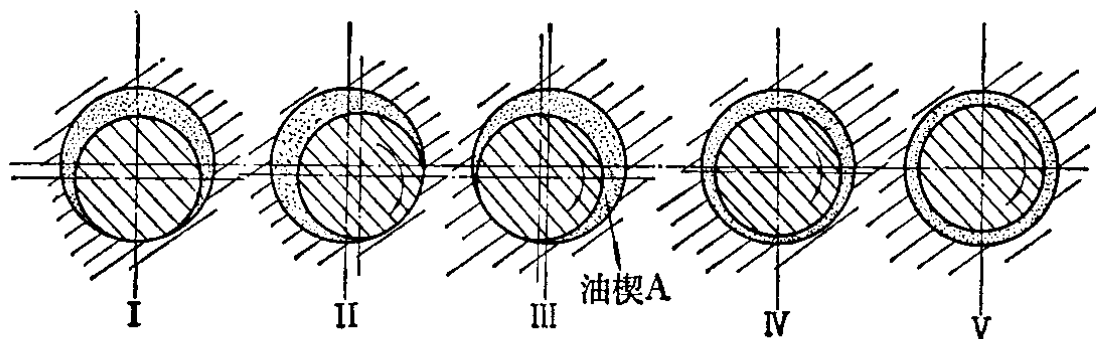


图 1-3 润滑油在轴承中的工作情况

当一轴承静止时，由于轴本身重量把下部润滑油挤开，轴颈与轴瓦直接接触（图1-3. I）。开始运转时，让轴顺时针方向旋转。因轴颈和轴瓦之间有摩擦，使得轴颈在轴承内向轴旋转相反方向偏移（图1-3. II）。之后，在吸引力作用下，润滑油即吸附于轴瓦的工作表面上静止不动，也粘附在轴颈上并与之一起旋转。但轴颈对轴瓦的压力阻碍润滑油从两者的接触线上通过，以致越聚越多，形成一个楔形，叫油楔（A），推动轴颈向轴旋转的方向偏移（图1-3. III）。在机轴转速越来越快时，油楔推力越来越大，同时轴颈与轴瓦接触线上聚集的油越来越多，最后把轴颈托起，使之与轴瓦分离（图1-3. IV）。机轴运转正常之后，轴颈对轴瓦的压力与油膜

的压力达到平衡。而两者之间的摩擦被润滑油分子之间的摩擦所代替。从理论上讲，轴转速趋于无限大时，轴颈与轴瓦的中心重合（图1-3.V）

这种油压的建立必须是：液体应该是粘性的，表面几何形状必须使得两表面相对运动时能产生一集聚的油楔。

在流体润滑中，全部摩擦是通过剪切液体润滑膜产生的，所以摩擦的大小是由油的粘度决定的：油粘度越小，摩擦越小，但粘度必须不低于一允许最低粘度。如果负荷和速度一定，粘度越小，则油膜厚度越小。如果粘度太低，油膜厚度小于表面凸起高度，膜就被穿透，结果摩擦和磨损升高。

流体润滑最大优点是摩擦系数很低（摩擦系数 $\mu \cong 0.001$ ），理论上是没有磨损的，但实际上很难完全做到。特别是起动和停车时，由于速度低，则膜很薄，易被穿透。当速度为零时，油膜厚度理论上也为零。

马丁（Martin）将流体润滑导出的雷诺方程式应用于齿轮润滑，建立了轮齿的流体润滑理论，这一理论用以确定最小油膜厚度 h_0 的公式如下：

$$h_0 = \frac{4.9\eta_0 UR}{P_n}$$

式中 η_0 ——在周围温度和压力下的绝对粘度吨·秒/英寸²；
U——相对滚动速度，英寸/秒；

R——综合曲率半径（英寸） $R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ （1.2.表示啮合的两齿）；

P_n ——单位齿长的法向负荷，英吨/英寸。

此公式是假设物体是刚性的，润滑油粘度是恒定的。刚性固体恒粘度润滑的油膜截面形状和油膜内压力分布如图 1-4.

所示。

马丁公式只适合于轻负荷条件的油膜厚度计算。流体润滑在齿轮润滑中，只有当齿面负荷很小，润滑条件非常好时才能出现。

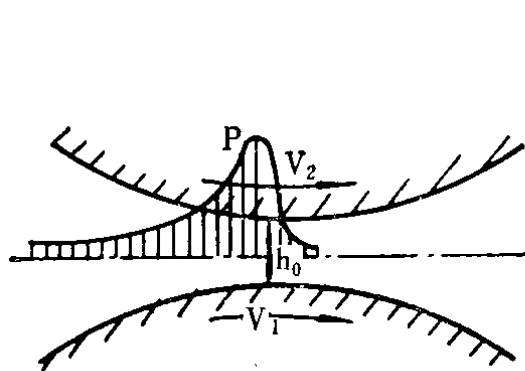


图 1-4 刚性固体恒粘度润滑剂液体压力分布

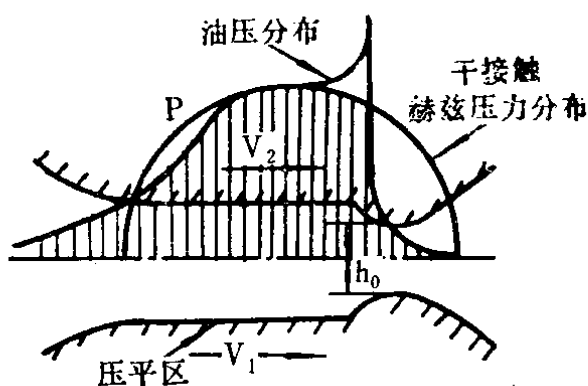


图 1-5 弹性流体润滑接触区油膜形状和油压分布

二、弹性流体润滑^[3、4]

上面所述的流体润滑是假设接触固体不变形，粘度不变的条件下形成的理论，只适于轻负荷，不能应用到较高接触应力的齿轮。对于较重负荷，按此理论计算的油膜厚度很小，以致于在最光滑的金属表面上也不能实现流体润滑。但是实际上，在这种条件下仍然可能被油膜隔开，达到令人满意的润滑。这是因为在高负荷下赫兹接触弹性变形所造成的压平区（见图1-5），以及油粘度随压力升高而增加等有助于形成和保持一定厚度油膜所致。

弹性流体润滑是这样一种润滑类型：相对运动两物体之间的摩擦和油膜厚度是由两物体的弹性和润滑油粘度相结合决定的。这里所谓的粘度包括随压力、温度和速度梯度或剪切率而变化的粘性。

弹性流体润滑理论是同时考虑了雷诺流体动力方程、接触体弹性变形的赫兹方程和润滑剂的粘度压力关系方程（当等温情况不占优势时，还要考虑能量方程和热传导方程）。但是弹性流体润滑最小油膜厚度公式的指数和系数，仍由实验求出。

早在四十年代，就已对弹性流体润滑进行了研究，直到1959年道森（Dowson）和希金森（Higginson）才将弹性流体理论由假设提高到理论分析。

目前，这个理论关于渐开线齿轮润滑的计算，仍是以对稳定状态的分析为基础（对于非稳定状态尚缺乏认识），并积累了大量资料。对于重载齿轮最小油膜厚度的计算已有了公认的成果。对于油膜比厚的有关限定，也有试验作依据，在实用中具有重要意义。

道森和希金森关于两圆柱体接触的最小油膜厚度 h_0 计算公式如下：

$$h_0 = 2.65\alpha^{0.54}(\eta_0 U)^{0.7} R^{0.43} P_n^{-0.13} E^{-0.03}$$

由此式可导出齿轮齿节线上最小油膜厚度 h_p （英寸）公式如下：

$$h_p = K \frac{(A \sin \phi)^{1.13}}{P_n^{0.13}} (\eta_0 n_p)^{0.7} \frac{m_g^{1.13}}{(m_g + 1)^{1.56}} \quad (\text{道森公式})$$

$$\text{式中 } K = 0.545 \frac{\alpha^{0.54}}{E^{0.03}};$$

对钢齿轮 $K = 0.4002 \alpha^{0.54}$;

对石油润滑剂润滑的钢齿轮，在170°F下 $K = 0.208$;

$$E \text{——换算弹性模数 } \frac{1}{E} = \frac{1}{2} \left[\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right],$$

式中 $E_1 E_2$ 和 $\nu_1 \nu_2$ 分别为接触面 1, 2 的材料弹性模数和泊松比。

对钢材而言 $E = 14700$ 吨/英寸²;

α —— 为粘度压力系数, 在 170°F 时 $\alpha = 0.30$ 英寸²/吨
在 250°F 时 $\alpha = 0.22$ 英寸²/吨

A —— 中心距, 英寸;

ϕ —— 压力角;

$m_g = \frac{N_g}{N_p}$ —— 齿数比;

n_p —— 旋转速度, 转/分;

($\eta_0 U R P_n$ 的意义均同流体润滑油膜厚度公式)。

在齿轮的啮合过程中, 虽然各点的油膜厚度值是不同的, 而且此式是按接触线上弹性流体润滑导出的, 但所得之油膜厚度可满意地使用于整个接触区, 只要齧齿的齿数不是太少, 或实际啮合线离理论啮合线两极点不是太近。

可见, 油的粘压系数在这里起很大作用。对大部分矿物油来说, 高压引起巨大的粘度升高, 例如在 100000 磅/英寸² 压力下, 粘度可以提高 10000 倍。所以进入两齿面之间间隙中的油, 在高压下的举动实际上类似一固体分隔层。矿物油有好的压粘系数, 这是它的有利之处。

弹性流体润滑对齿轮润滑来说是相当重要的, 大部分的较轻负荷到中负荷的工业齿轮润滑, 可能都属此种润滑。近来这一理论发展很快, 这里仅是初步介绍。

三、边界润滑

如果压力太高, 操作速度太慢或表面粗糙度太大, 则润滑油膜发生破裂, 在局部凸出点之间产生接触, 结果摩擦升高, 产生磨损。随着操作条件更加苛刻, 润滑油膜破裂程度

增加，直到最后引起擦伤和胶合。

如果在矿物油中加入某些极性有机化合物，则能提高润滑能力。这种化合物的作用是在金属表面上形成牢固吸附层表面膜。虽然一般仅形成一或两个分子层，但它们能阻止金属对金属的直接接触。由这种持续的边界层提供的润滑类型叫边界润滑。这种润滑油的添加剂叫油性添加剂。

当两齿轮以极低速度和很高压力接触时，流体润滑或弹性流体润滑的范围内油膜降低到了最小值，就不能成功地润滑。这就要靠边界润滑剂（通过油性剂的润滑作用）来润滑。边界润滑的润滑剂是油中加有油性添加剂，通常是加有带极性端基的长链有机化合物，如长链醇、胺和脂肪酸等。它们起边界润滑作用的示意图如图 1-6 所示。

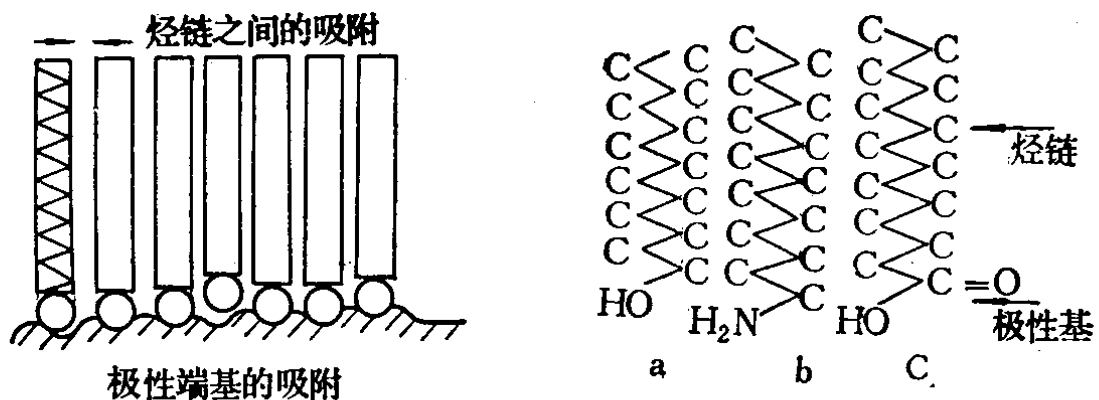


图 1-6 边界润滑润滑剂分子的组成和吸附示意图

a、b、c 一分别为醇、胺和酸

这些油性剂分子的极性端基牢固地吸附在金属表面上，定向地整齐地排列成一吸附膜，而且因为链本身之间的吸附也较强，所以要穿透此膜就比较困难。被这种膜所复盖的两

金属表面进入接触滑动时,倾向于在吸附分子最外层上滑动。这样一种吸附膜叫物理吸附膜。这种吸附是可逆的,温度升高时,便脱附而失去润滑作用。

如果矿物油中加入的是脂肪酸,如硬脂酸,则它与铁铜等金属发生反应形成硬脂酸皂,它能更好地吸附在金属表面上,比硬脂酸本身有更好的润滑作用。这种吸附叫化学吸附,是不可逆的。因为温度如超过油性剂(脂肪酸)熔点,一般就会脱附失效,而脂肪酸皂比脂肪酸有更高的熔点,所以化学吸附的油性剂在较高温度下还能起润滑作用。

四、极压润滑

上面我们看到,最好的油性剂在较高温度下也会失效。如果在更苛刻负荷条件下操作,则表面压力更大,温度也更高,即达到所谓“极压”润滑状态,这时用的润滑剂,必须加一种叫“极压添加剂”(简称极压剂)的物质,才能达到满意的润滑。

极压添加剂通常是含硫、氯和磷的有机化合物。在高温下,它们与金属表面反应,形成一种能防止金属对金属直接接触的无机物表面膜。形成的膜有低的剪切强度,它不仅能保护表面,而且有低的摩擦系数。

虽然极压添加剂必须与金属反应,但也不必太活泼。因为太活泼会形成化学腐蚀。只有当有胶合危险时,金属表面温度很高,极压剂才应该与金属表面反应,而在温度低时不能发生这种反应,即这时不起润滑作用。因此,必须在极压润滑油中加入少量脂肪酸之类的油性剂,它在极压剂活化温度(T_r)以下提供有效的润滑,如图 1-7 所示。

图1-7,为摩擦系数对温度的作图。曲线 1 是石蜡油(基础油),摩擦系数一开始就较高,以后随温度的升高而逐步升

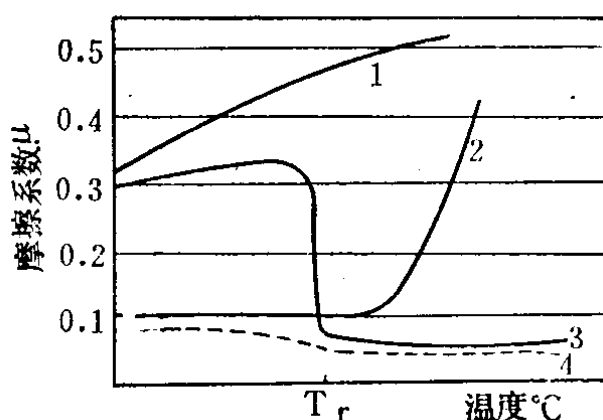


图 1-7 不同类型润滑剂摩擦系数与温度的关系
 1—石蜡油；2—石蜡油+油性剂(脂肪酸)；3—石蜡油+极压剂；4—石蜡油+极压剂+油性剂(脂肪酸)

高。曲线 2 是脂肪酸溶在基础油中，它与金属反应形成金属皂，从室温到皂开始熔解的温度都能提供良好的润滑。曲线 3 是极压添加剂溶解在基础油中。极压剂与金属表面反应在低于 T_r 时很慢，所以在这阶段润滑很差；在 T_r 以上就能形成保护膜，直到很高的温度还能提供有效的润滑。曲线 4 是脂肪酸加到含有极压剂的油中所得到的结果。在低于 T_r 温度时，脂肪酸提供良好的润滑，在这个温度以上，极压剂提供良好的润滑。当然，这只是理想的情况，实际上并不总是能够得到的。因为组分之间互相有妨碍；某些极压剂有抑制脂肪皂生成的倾向；高温下某些脂肪酸，特别是浓度过大时，可能与极压剂竞争金属表面而影响极压剂的作用。

在重负荷或极重负荷下的工业齿轮润滑和双曲线齿轮润滑都是属于边界润滑到极压润滑范围。极压工业齿轮油和汽车双曲线齿轮油就是用于齿轮边界润滑和极压润滑条件下，以保证齿轮处于良好的润滑状态，达到满意的运转目的。

第二章 齿轮油的性质

第一节 齿轮传动对齿轮油性质的基本要求

齿轮油在齿轮传动中起着很重要的作用：

- (1) 降低齿轮及其他运动部件的磨损，这对保证齿轮装置正常运转和齿轮寿命是很重要的；
- (2) 降低摩擦，因而降低功率损失；
- (3) 分散热量，有冷却作用；
- (4) 防止腐蚀和生锈；
- (5) 降低噪音、振动和齿轮之间的冲击；
- (6) 冲洗污染物，特别是冲洗齿面上的固体颗粒，以免磨损。

为了保证齿轮传动的正常运转，满足各种使用条件的要求，达到齿轮良好润滑的目的，因而对齿轮油性质提出一定的要求。

齿轮油的性质除了要求一般的理化性质以外，更重要的是要求必要的使用性能。齿轮油的主要目的是润滑各类齿轮，所以各种类型的齿轮油都有其共同的性能要求，如要求适合的粘度，良好的极压抗磨性、热氧化安定性、防锈防腐性、抗泡沫性。由于齿轮油使用目的不同和使用条件上的差别，所以上述性能要求的程度是有差别的，并且还有各自的其他性能要求。现将对不同类型齿轮油的要求列出如下。

对汽车后桥齿轮油要求的性能：

- (1) 极压抗磨性优良；

- (2) 具有适当的粘度特性;
- (3) 低温流动性良好;
- (4) 热氧化安定性良好;
- (5) 不产生腐蚀、不生锈;
- (6) 泡沫少;
- (7) 不使橡胶等密封材料溶胀或硬化。

工业齿轮油品种繁多,使用条件也复杂,但从润滑条件考虑,主要分为闭式工业齿轮油和开式工业齿轮油。闭式工业齿轮油一般要求如下:

- (1) 有适当的粘度;
- (2) 极压性和油性良好;
- (3) 热氧化安定性良好;
- (4) 防锈防腐性好;
- (5) 抗泡性好;
- (6) 抗乳化性(分水性)好。

开式齿轮油除要求具有闭式齿轮油性能外,还要求粘附性和抗水性好。

此外,蜗轮用润滑油还要求有很好的油性。

齿轮油在使用中受到齿轮的机械剪切,如果齿轮油中加了高分子物质之类的粘度指数改进剂和降凝剂,特别是在所谓的多级齿轮油中,则高分子可能被剪断成较低的分子,从而使粘度降低,所以在这种情况下还要求剪切稳定性好。

第二节 齿轮油的主要理化性质

齿轮油的一般性质主要有粘度特性、凝点、闪点、残炭、灰分和酸值等。现简要介绍如下。

一、粘度特性