

典型机械零部件润滑 理论与实践

陈家靖 李文哲 编著

中国石化出版社

编写说明

《典型机械零部件润滑理论与实践》一书系根据广州机床研究所30多年来，在全国工矿企业开展设备润滑研究的基础上，吸收了世界发达工业国家在设备润滑方面的先进理论和经验编著而成的。5年前，本书中心内容曾以讲义的形式，油印成册，并多次作为全国润滑技术学习班的教材。本书具有下列特点：（1）实用性——理论联系实际，因此具有较大的实用价值；（2）可靠性——表格中的大量数据来自基层，同时也是30多年科研实验中得出的数据，因此其数据可靠；（3）全面性——既谈机械方面的知识，又谈油品方面的知识，并且阐明它们两者之间的联系；（4）可比性——既谈国外的经验又谈国内的经验；（5）综合性——列出世界发达工业国家关于典型的机械零部件各种选油方法，这样可为机械设计人员根据自己所能掌握的机械参数选择其中一种方法；（6）国产化——原书中关于国内外油品对照的叙述占有相当的篇幅，这样为进口机械使用油品国产化提供可靠的手段。

本书由广州机床研究所研究员级高级工程师陈家靖担任主编并负责第一章、第三章、第四章编写和全书的最后定稿工作，第二章由广州机床研究所所长李文哲高级工程师负责编写，广州机床研究所高级工程师陈景华、李梦琴和工程师詹平丁为本书提供许多很有实用价值的实验数据和资料，全书经广州机床研究所副总工程师汪德涛研究员级高级工程师仔细审阅并提出许多宝贵的修改意见。

本书在编写过程中广泛得到全国工矿企业的大力支持，特别是下列同志：第二汽车制造厂李先发，第二重型机器厂刘天况、茅庆龙，沈阳鼓风机厂张大江、徐振民，杭州汽轮机厂史永刚，济南第一机床厂徐家林，东方汽轮机厂黄莉民，北京石油科学研究院陈铁飞，兰州炼油化工总厂刘贻民等。在此向他们表示衷心的感谢。

由于编著者水平有限，错误在所难免，敬请读者批评指正。

编著者

2A081/04

目 录

第一章 齿轮润滑的理论与实践	1
第一节 概述	1
一、齿轮分类的一般知识.....	1
二、国外齿轮油分类的一般知识.....	1
三、国内工业齿轮油的分类.....	3
四、齿轮的损坏类型与润滑关系.....	3
第二节 闭式齿轮的润滑	5
一、齿轮润滑的特点.....	5
二、齿轮润滑剂的作用.....	7
三、对齿轮润滑剂所要求的特性.....	8
四、选择齿轮润滑油的几种典型方法.....	9
五、齿轮润滑方式的选择和供油量控制.....	41
第三节 蜗轮副的润滑	55
一、3种常用蜗轮副类型及其润滑特点.....	55
二、蜗轮润滑剂的作用及对它所期望的特性.....	58
三、选择蜗轮副润滑油的几种典型方法.....	58
四、蜗轮副润滑方式的选择和供油量控制.....	67
第四节 开式齿轮的润滑	67
一、国外开式齿轮油的类型.....	67
二、国内开式齿轮油的品种、性能.....	67
三、4个典型开式齿轮油性能、规格.....	67
四、美国Mobil石油公司开式齿轮油应用介绍.....	70
五、美国齿轮制造商协会AGMA推荐的开式齿轮油有关表格.....	71
六、日本润滑学会推荐的开式齿轮传动的润滑油粘度.....	72
七、国外开式齿轮油应用实例.....	72
第二章 液压油有关理论与实践	73
第一节 液体传动简介	73
一、液压传动原理.....	73
二、液压系统组成.....	73
三、液压传动的优缺点.....	74
四、液力传动原理.....	74
五、液力传动的优缺点.....	74
六、液力传动的应用.....	75
第二节 液压传动系统的摩擦磨损和对传动油的性能要求	75
一、液压传动系统的摩擦磨损.....	75

二、液压系统对液压油的性能要求	78
三、液力传动系统对液力传动油的性能要求	83
第三节 液压油的分类及选用	84
一、液压油的分类	84
二、正确选择与合理使用液压油	85
三、引进液压设备用油国产化的原则、程序与注意事项	91
第四节 液压传动的应用及其选用油实例	99
一、机床	99
二、冶金机械	99
三、工程机械	99
四、矿山机械	100
五、农业机械	100
六、汽车及飞机	100
七、船舶	100
八、纺织机械	100
九、塑料机械及其它机械	100
十、国产液压设备(元件)选用液压油调研汇总及推荐表	100
第五节 液压技术发展趋势及国内液压油发展概况	116
一、国外液压技术发展趋势及选用液压油概况	116
二、我国液压技术和液压油发展过程梗概	116
第六节 液压系统的操作与维护	117
一、液压系统故障和液压油污染原因	117
二、液压系统和液压油的维护	118
三、液压系统的故障分析和处理	119
第三章 导轨润滑的理论与实践	125
第一节 概述	125
第二节 导轨润滑的基本原理	126
一、导轨工作的特点	126
二、导轨润滑剂的作用	126
三、导轨的磨损与失效	126
第三节 导轨润滑的有关表格	126
第四节 各类机床导轨润滑状态分析表	137
第五节 机床的爬行问题	140
一、产生爬行现象的原因与理论分析	140
二、产生爬行的机床类型	141
三、解决机床爬行的方法	142
四、国内外导轨油和导轨-液压油系列的防爬性能	142
五、导轨油在机床上的防爬试验	144
六、润滑剂的静、动摩擦系数之差与机床防爬性能的关系	150
第六节 机床导轨润滑油的正确选择	150

第七节 机床导轨润滑方法的选择	151
第八节 机床导轨的维护保养	151
第四章 轴承润滑的理论与实践	152
第一节 概述	152
一、滑动轴承分类的一般知识	152
二、滑动轴承的失效类型与润滑的关系	154
三、主轴温升与热变形	154
第二节 动压滑动轴承的润滑	156
一、单油楔、多油楔动压轴承的概念与实际应用	156
二、滑动轴承对润滑剂的选择	158
三、在选择滑动轴承润滑油时应考虑的主要因素	156
四、选择滑动轴承润滑油的几种典型方法	161
五、径向轴承的设计界限	
六、滑动轴承润滑方式的选择和供油量控制	173
七、进口设备滑动轴承用油润滑的典型例子	174
八、滑动轴承对润滑脂的选用	174
第三节 静压轴承的润滑	179
一、静压轴承与动压轴承的差别	179
二、静压轴承润滑方面的分析计算	179
三、静压轴承对润滑油的要求	182
四、静压轴承对润滑油的选用	183
五、液体静压轴承的装配、调试中常见的失效问题及消除方法	183
第四节 滚动轴承的润滑	185
一、概述	185
二、选择滚动轴承润滑油的几种典型方法	191
三、进口设备滚动轴承用油润滑的典型例子	194
四、滚动轴承用油润滑的润滑方式和油量控制	196
五、滚动轴承选用润滑脂应考虑的因素	197
六、滚动轴承如何选用润滑脂	199
七、各类设备滚动轴承用脂的选择实例	203
八、进口设备滚动轴承用润滑脂的典型例子	203
九、弹性流体动压润滑理论在滚动轴承上润滑实践的应用例子	207
附录	209
一、齿轮润滑剂的选择(润滑油)——DIN51509第一部分	209
二、润滑剂分类工业用油和有关产品——C族——“齿轮”	214
三、工业齿轮润滑油种类的选择	215
四、新旧牌号对照参考图	216
五、各种粘度系统的相应润滑剂等级	217
六、国内外开式齿轮油对照表	218
七、国内外工业齿轮油对照表	219

八、导轨油和导轨——液压油对照表·····	220
九、国内外主轴油对照表·····	221
参考文献·····	223

第一章 齿轮润滑的理论与实践

第一节 概 述

一、齿轮分类的一般知识

依靠连续啮合的齿传递运动和动力的机械零件叫做齿轮。一对齿轮分别装在主动轴和从动轴上，利用两齿轮轮齿的相互啮合，以传递运动和动力，叫做齿轮传动。

齿轮和齿轮传动的分类方法较多，如按齿轮的齿廓形状、齿轮的轮齿外形、两个齿轮轴线间的相对位置和齿轮传动的外部结构分类等。

按齿轮的齿廓曲线来分类，可分为渐开线齿轮、圆弧齿轮和摆线齿轮。所谓渐开线齿轮，就是齿廓呈渐开线的齿轮，它的瞬时速比是恒定的，是目前应用最广泛的齿形。圆弧齿轮是轮齿的齿廓为凹凸圆弧的齿轮，它是随着提高齿轮承载能力的要求而出现的一种新型齿轮。它在传递同样的圆周力时，比渐开线齿轮的齿面应力低。同时它的轮齿没有根切现象，因此圆弧齿轮广泛应用于冶金、矿山等重负荷机械上。摆线齿轮主要用于钟表行业。

齿轮按其外形可分为圆柱齿轮、锥齿轮、非圆齿轮、齿条和蜗杆蜗轮。齿轮按其齿线形状可分为直线齿轮、斜齿轮、人字齿轮和曲线齿轮。

此外，齿轮还可按两个齿轮轴线的相对位置来进一步分类；若按齿轮传动装置的外部结构分为闭式、开式和半开式三类。

二、国外齿轮油分类的一般知识

(一) 有添加剂的齿轮油

这种类型油是由矿物油与防锈剂和抗氧剂组成的（R & O型），多半还加抗泡剂或抗磨剂，防锈剂主要是为了防止铁金属表面生锈，抗氧剂主要是为了延迟酸性化合物、沥青质形成的速度，降低油品粘度的增加速度。这种类型油适用于传递轻载和中载负荷的正齿轮、斜齿轮和锥形齿轮，对于齿轮尺寸和速度范围较广和温度为 $-20\sim+120^{\circ}\text{C}$ 的齿轮均适用。这种油也适用于轴承和齿轮在同一个润滑系统的场合。由于这种油不能牢固地粘附在齿轮表面，要不断将油补充到齿面上，这类油可以有效的冷却齿轮并带走啮合过程中的热量和磨损颗粒或磨屑，很容易与滤油器和热交换器相适应，从而保持油的清洁和恒温。

(二) 极压齿轮油

这种油基于上述基础上加入极压剂用来控制如开机、停机和冲击负荷情况等边界润滑条件的磨损。极压剂有两大类型，第一类型为化学活性剂，如硫、磷化合物，这种化合物在高温下能与齿轮表面材料起化学反应生成一种易于剪切的薄膜，如果在啮合表面的凸点产生接触，则接触处的材料将剪切而不是烧伤和胶合，用这种控制齿轮磨损的办法来代替破坏性磨损。第二类型为悬浮的固体润滑剂，如石墨、二硫化钼、硼酸盐等，可在齿面间防止金属之间接触。极压油可用在重负荷的正齿轮、斜齿轮、锥齿轮，也可用在蜗轮和双曲线齿轮。其使用温度范围为 $-20\sim120^{\circ}\text{C}$ 。

如果轴承与齿轮共用一个润滑系统，应注意下列事项：采用的活性极压剂应对青铜无腐蚀；由于固体润滑剂在小间隙、高精度轴承上可能减少间隙而导致高温和失效且由于极压油

也不能牢固地粘附在齿轮表面上，因此必须将这种油不断地补充到齿轮表面上，采用极细的过滤器能除去固体润滑添加剂，但是，冷却和过滤都能使这类润滑剂降低啮合齿轮的温升。

(三) 复合齿轮油

这类油是汽缸油中加入无酸的脂或牛脂作为油性添加剂以降低摩擦，由于蜗轮副存在相当高的滑动速度，所以需要减摩剂以减少发热及提高效率，这类油的选用温度范围为5~120℃。由于这类油并不粘附在齿面上，而且在齿啮合时被挤走，因此必须经常补充润滑油。使用这类油时，通常采用冷却和过滤装置以降低蜗轮副的啮合温度。

(四) 开式齿轮复合油

这类油的粘度很高，主要用在大型、低速重载的齿轮装置上。这类油含有粘性添加剂以粘附在齿面上并防止甩走或在啮合时被挤走。由于这类油很稠，所以使用时，必须加入溶剂使其变软。溶剂挥发后在齿面上留有较厚的保护膜。由于这类油能牢固地粘附在齿面上，所以没有必要经常补充，这类油适用的温度范围为5~120℃。若润滑轴承时要估量一下这类润滑剂是否适用于轴承。这类油不能对齿轮进行冲洗和冷却。

(五) 润滑脂

润滑脂是将稠化剂分散于液体润滑剂中所组成的一种稳定的固体产品。润滑脂是用皂将润滑剂稠化成凝胶状物质。这些稠化剂储存着部分液体，当必要时，它将从海绵状胶体中放出油来，液体部分作为润滑剂这是它的优点，润滑脂中的基础油类型、粘度取决机械零件的负荷和操作温度，润滑脂不需要经常补加及加脂的间隔时间长也是它的优点，某些机械零件难以用润滑油润滑或者润滑维护很困难，因此期望润滑脂同这种零件同寿命，即润滑脂装入后能保持正常润滑一直到机器零件损坏为止，如小电动工具或家庭设备。润滑脂也能起密封作用，防止灰尘和湿气进入。缺点是不能象油那样连续流动，不能带走热量和啮合时的磨损颗粒。

润滑脂可用在正齿轮、斜齿轮、蜗轮和锥齿轮上，它一般局限在低速或很小负荷或间断操作的轻负荷零件。高速时会使脂流失或者被齿轮齿带走并妨碍润滑脂到达所需要的区域。正确选择润滑脂的稠度是很重要的，润滑脂的使用温度取决于基础油类型、粘度和皂的类型，其中多效能脂的使用温度为-30~120℃。

各类齿轮选用那种润滑剂见表1-1。

表 1-1 各种类型齿轮选用的润滑剂类型

润滑剂类型	正 齿 轮	斜 齿 轮	蜗 杆	锥 齿 轮	双 曲 线 齿 轮
抗氧化和抗腐蚀的矿物油	正常负荷	正常负荷	轻负荷低速	正常负荷	不推荐使用
极压油	重负荷或冲击负荷	重负荷或冲击负荷	对于大多数使用能满足要求	重负荷或冲击负荷	大多数应用场合可满足要求
复合物（约加牛脂5%）	通常不推荐使用	通常不推荐使用	对大多数齿轮制造厂可优先选用	通常不推荐使用	只用于轻负荷下
高粘度的开式齿轮油	低速开式齿轮	低速开式齿轮	低速（需要使用加极压剂的开式齿轮油）	低速开式齿轮	低速（需要使用加极压剂的开式齿轮油）
润滑脂	低速开式齿轮	低速开式齿轮	低速（需要使用加极压剂的开式齿轮油）	低速开式齿轮	不推荐使用

除了石油基润滑剂外，许多类型的合成润滑剂也是有效的，尽管合成润滑剂的成本高于石油基润滑剂，但它们具有特殊的优点，如在低温下没有固化和在高温下不会形成碳的沉积物，合成油的使用温度范围为 $-73\sim 260^{\circ}\text{C}$ ，由于合成润滑剂具有高粘度指数，因此它们受温度影响较小。在防火要求高的地方也要求使用合成油，使用合成润滑剂时应该考虑润滑性、承压能力以及它与油漆、塑料、密封件和填料之间的协调性。

其它类型的润滑剂包括固体润滑剂如石墨、二硫化钼、氟碳聚合物等，某些固体润滑剂能够使用在高达 540°C 的温度下，甚至更高。固体润滑剂可以综合使用，既可以单独使用，也可以把液体作为载体使用，使其液体挥发或复原后再行使用。在补充润滑剂很困难的地方或润滑剂泄漏污染其它零件的地方可采用固体润滑剂。

三、国内工业齿轮油的分类

关于工业齿轮油，可分为封闭式工业齿轮油、开式齿轮油和蜗轮蜗杆油三大类型。

(一) 工业齿轮油

1. 防锈抗氧工业齿轮油 (简称R & O齿轮油)

是以精制矿物油加入适量抗氧剂和防锈剂而制成，具有较好的防锈性和氧化安定性。

2. 中负荷工业齿轮油 (Mild E. P.)

是以精制矿物油为基础油，除加有防锈剂和抗氧剂之外还加有专门化学添加剂而制成。它比R & O型齿轮油具有更好的抗极压性能。按极压添加剂类型又可分为铅型和硫磷型两种，其使用部位仅仅是根据齿轮制造商推荐来选用。

3. 重负荷工业齿轮油

这类型齿轮油主要用在钢铁工业封闭式齿轮及其它工业部门操作条件比较苛刻的齿轮箱上，它比中负荷工业齿轮油具有更好的抗极压性和更好的热氧化安定性。按极压剂不同，可分为铅型和硫磷型两种。

(二) 蜗轮蜗杆油

这类油品是以精制矿物油或合成油作为基础油，加入3~10%脂肪或合成脂肪，也可以加其他油性添加剂。兰州炼油化工总厂、沈阳化工厂、茂名南海高级石油公司和广州机床研究所已在这方面做了不少研究工作，并研究出用户需要的N150、N220、N320、N460、N680、N1000六个粘度等级的蜗轮蜗杆油。

(三) 开式齿轮油

开式齿轮油由矿物油、沥青、裂解聚丙烯、环烷酸铅、石油碳酸钡、二烷基二硫代磷酸锌等调合而成。目前兰州炼油化工总厂已有系列产品，其性能质量指标见后面表1-28。

四、齿轮的损坏类型与润滑关系

(一) 轻微磨损

轻微磨损对齿轮装置是有利的，在齿轮磨合时间，通过表面上的微凸体逐渐磨平使之成为较为光滑的表面，由于轮齿在再次接触之前和许多齿有接触，这样会普遍均匀地减少齿廓误差。如果两个啮合齿的动态对中轻微偏离，那么最初磨损是由于除去最硬接触面而产生的，并且使更多的接触面积来承受负荷。对最初轻微磨损的这些齿形进行轻微修正，将使其齿轮在满负荷操作下能正常运转和减少出现损坏的机会，在跑合期间，有意采用低粘度润滑剂来润滑其齿轮，然而粘度控制还依赖于最初的负荷和令人满意的磨损值，在跑合期间应经常检查齿表面以防止过多磨损而导致破坏性磨损，当齿轮表面达到足够的啮合一致性后能承受其负荷，最初的磨损出现后应能自动并及时终止最初的磨损。

（二）中等磨损

中等磨损是由齿轮表面的更大不规则性引起及齿轮齿的误差大、有负荷变化、润滑剂粘度不足或在某种条件下使其齿轮工作在混合膜润滑的边界润滑条件等原因造成。润滑剂中的磨料也能产生这类磨损，这类磨损不会自动停止而是慢慢地延续比较长的时间，根据齿轮寿命的不同要求，这类磨损可以允许，也可以不允许，视实际情况而定。

（三）重磨损

重磨损会迅速除去齿面材料，破坏齿轮的形状和齿轮装置的平稳操作。在完全没有润滑剂的条件下，或过载荷或接触齿表面的严重误差都会发生这种磨损。如果破坏原因没有找到和不及时修正，那齿面形状的破坏将导致齿轮装置的短寿命。

检查齿轮过多磨损或失效原因，不是一件简单的任务，最后的失效类型可能是完全不同于过去已知的磨损机理，讨论若干种常见磨损类型有助于按一定秩序分析导致齿轮装置过多磨损或失效的原因。

（四）破裂

当轮齿承载时，弯曲应力超过材料疲劳极限，将会出现破坏性失效，破坏齿的一部分或整个齿。这种破裂开始时出现裂纹，并随着重复的负荷循环扩展而显示为典型的疲劳失效。有时可能在一个负荷循环中损坏一个齿，这并不属于疲劳失效。破裂通常是由于冲击负荷、高振动负荷、大块的碎片通过啮合区而引起的或者由于齿轮误差造成小区域面积来承受负荷，很明显，润滑不是主要因素，主要因素是机械缺陷，必须找出和改进。

（五）点蚀

由于高负荷使齿轮表面小区域凸点产生过应力作用，这种普遍的表面疲劳的形式也就出现了。当这种情形出现后，即在重复循环后，先在表层内部出现裂纹，之后扩展到表面，当一块材料不能支承时，它就离开齿表面，结果产生小凹坑。当机加工留下来的凸点被除去后，小凹坑在新齿轮上也形成。一旦在接触的区域足以支承负荷时，点蚀可能停止，其表面开始抛光，如果这种情况出现，最初的点蚀可认为是无害的。如果点蚀不断扩展，材料迅速地离开其齿面，那么由较少的表面来承受负荷。这种状况若不及时纠正，齿面的材料将逐渐减少，最后会使齿破裂。这种情况不是润滑失效。这种现象往往是由齿轮齿的偏斜而产生，由齿面的局部小面积来承受负荷而导致高应力。使用齿轮材料太软或操作负荷大于设计负荷也会产生点蚀。采用高粘度油有利扩大齿轮齿接触面积，但调整润滑剂，其作用不大，采用某些极压添加剂可以延长齿轮寿命，但不能真正解决其问题。

（六）剥落

剥落机理和点蚀相同，从硬齿面或表面硬化齿面上除去大的薄片或碎片金属，由于热处理不当所产生的应力或表面下的裂纹而产生这些碎片，很多凹坑形成后联合在一起也就形成剥落。剥落不是润滑问题，它是材料缺陷、过载或其它使用问题。

（七）塑性流动

这种磨损类型表明齿轮表面变形，是由于重载而使应力超越齿轮材料的弹性极限而产生这种表面变形，通常在软材料中出现这种情况，表面材料可能沿齿根和齿顶挤压，最后在齿面上形成鳍状物，节线起皱和齿根凹陷也是属于这类磨损的范畴。若这类磨损是由强烈振动或冲击负荷引起，那么高粘度润滑剂有缓冲负荷的作用，但这种磨损类型是由材料失效引起，所以改变润滑剂不能解决这类问题。

（八）擦伤

这是磨料磨损的一个类型，当硬颗粒尺寸大于隔开齿轮表面的油膜厚度并进入齿轮啮合区域时，齿表面在滑动方向就会出现擦伤，这些颗粒可能是灰尘、沙、氧化铁熔渣、齿轮或轴承材料上的碎片或其它，这些东西以各种方式进入润滑系统。上述这些杂质在很简陋的罩或暴露条件下，通过某些小孔进入润滑系统。也可能是没有认真清洗油箱或装配旋转零件时混入杂质而造成。碎片也可能是齿轮啮合时磨损的产物。通过实验分析可指出这些颗粒材料的类型，增加润滑剂粘度能够提高油膜厚度，这样可减轻擦伤，但不能根治它。最好的解决办法是对润滑剂进行精密的过滤和改善环境污染条件以除掉其颗粒。一旦这些问题得以解决，齿轮表面的恶化也将会停止。

(九) 胶合

当齿面上的凸点或粗糙部分破坏油膜使金属接触后，金属可能熔接在一起，然后又随着齿面的相对运动使金属从材料较软的齿面上撕裂下来，熔化到另外的齿面上，同时犁削啮合面沿滑动方向留下沟痕，导致材料的迅速去除，降低齿轮传动的平稳性。产生这类磨损表示这种润滑剂失效，即此油膜不足以保持齿轮齿表面分开，增加润滑剂粘度将增加其油膜厚度，通过极压添加剂产生易于剪切的熔化保护膜以阻止胶合，从而使齿表面相当光滑，如果表面已发生严重胶合时，必须马上换上正确的润滑剂，并小心磨光或用其它方法治愈其胶合的表面。

(十) 腐蚀磨损

轻微点蚀或齿表面生锈或暴露的、无油漆的金属表面会出现腐蚀和腐蚀磨损。腐蚀可能由于油中的冷凝水或者水冷热交换器中漏出的水而引起，也可能是由于润滑油的酸或腐蚀性添加剂，通过齿轮啮合作用去除已腐蚀的金属并逐步向新鲜的金属表面扩展，某些润滑油添加剂通过阻止在齿轮表面生锈而达到预防腐蚀。另外一种办法是阻止油氧化来防止酸的形成。如果知道产生腐蚀的原因来自外部，还是有办法解决的。

(十一) 烧焦

如果齿轮齿遭受强热，将失去材料硬度，这种软化的材料将被迅速去除，因为它不能承受相应负荷，这种现象的特点是齿轮表面由于温度高而使其变色，如果热源来自外部，那必须予以纠正，如果是摩擦问题，就要重新考虑润滑剂类型和润滑方法。

第二节 闭式齿轮的润滑

一、齿轮润滑的特点

齿轮润滑与一般零件的润滑（例如轴承的润滑）相比较，有很多特殊性：

(1) 与滑动轴承相比较，多数齿轮的当量曲率半径小，一般为几十毫米，因此形成油楔的条件差。

(2) 齿轮的接触压力非常高，例如轧钢机的主轴承比压一般为20MPa，而轧钢机减速器齿轮比压一般为500~1000MPa。

(3) 齿面间同时存在滚动和滑动，而且滑动的方向和速度急剧变化，从表1-5可以看出，其很大一部分齿轮，它们的滑动速度与节圆速度的比值大于0.3。

(4) 润滑是间歇性的，每次啮合都需重新建立油膜，形成油膜的条件较轴承相差很多，例如轧钢机主轴承的 $\eta \cdot n / p$ 值（ η ——油的粘度； n ——主轴的每分钟转数； p ——单位面积压力）一般为140，而轧钢机减速器齿轮为20左右。

(5) 齿轮的材料、热处理、机械加工、装配等对润滑状态也有所影响，尤其是齿面形态和粗糙度对其润滑状态影响最为明显。

下面更详细说明齿轮传动的特点和齿轮润滑剂的工作条件：

齿轮啮合时，是否产生滑动要视齿轮的种类而定，轴心线平行的圆柱齿轮和轴心线互相垂直的圆锥齿轮均属于普通齿轮，它们的特点是相啮合齿轮表面互相转动而没有滑动，因此在啮合区是纯滚动；螺旋圆柱齿轮、螺旋圆锥齿轮、蜗杆传动均属于螺旋齿轮传动，这些传动的特性在于：它们的运动是螺旋型，其表面不仅有互相滚动，而且彼此有相对滑动，由于存在接触线方向的滑动，故与普通齿轮传动比较起来，齿面滑动速度的绝对值增大，因而不利于在齿轮间形成承压油层。这种不利因素会导致齿面间液体润滑比例相对减少，出现边界润滑，使摩擦系数增高和发热值增大。

伯佐夫 (Borsoff) 把齿轮润滑的机构简述如下：当齿轮旋转时，若存在润滑剂就形成一个流体动力油楔，当负荷低时，在齿轮啮合时其油楔能隔开齿接触，当负荷增加时，接触区域的压力也增加，润滑膜的厚度随之减小，当负荷增加到足以破坏流体膜时，就不能阻止啮合表面的凸点接触，磨损也就发生了。

伯佐夫认为磨损的性质决定于速度，齿轮润滑按速度分为3个区域，第一个区域是慢速区域，其转速低于1000r/min；第二个区域是中速区域，其转速为1000~3000r/min；最后一个区域是高速区域，其转速为8000~30000r/min。

根据磨损类型和工作表面情况也可分为3个区域，即：厚膜润滑区域（没有磨损）；磨料磨损区域；胶合区域。

在慢速区域，由于速度降低，润滑剂的承载能力增加。例如使用 $9.92\text{mm}^2/\text{s}$ 、 37.8°C (100°F) 的油，当速度低于665r/min时，没有发生胶合，但当负荷增加时，在低速条件下也发生磨损，因此可以认为这样的磨损是由磨料产生的。

在中速区域，轻负荷的齿轮是在厚膜润滑下工作，因此磨损看不出来，负荷增加时，剪切产生的热使润滑剂的粘度降低，流体膜被破坏，使金属接触，产生胶合。这类磨损不是逐渐增加而是跳跃式增加，在第一个负荷范围的开头跳跃一下，以后不再增加，到第二个负荷范围的开头再跳跃一下，在此条件下，最低粘度的油具有最大的磨损，在低负荷时也发生磨损。

在高速区域，速度增加，载荷能力也增加，这归功于两个因素，一是松弛现象；二是挤压效应。根据松弛效应理论，液体润滑剂在发生高速变形时会象弹性固体一样反应。把所有的润滑剂挤出齿轮的接触区域是需要一定的时间的，在高速时接触时间是很短的，所以不能挤出所有的油。

上述齿轮润滑机构适用于非活性矿物油组成的润滑剂。可以认为，润滑剂的粘度越高，载荷能力和抗磨损性越大。然而为了满足其他方面的要求，常常需要使用低粘度的油，当负荷高于第一胶合负荷时，使用非活性矿物油给齿轮工作带来很大的困难，因此在高负荷时，需要使用极压 (E·P) 润滑剂。

伯佐夫认为当负荷高于基础油的胶合负荷时使用极压润滑剂，磨料磨损有时也是存在的。同样在低速重负荷时也可发生磨料磨损，磨损程度决定于极压添加剂的特性及浓度。

为了更全面地讨论齿轮润滑问题，其它研究者的看法应该考虑，麦卡科努奇 (Macconochie) 等人认为齿轮接触压力700~1000MPa，相当于轴颈轴承接触压力1MPa，轴颈轴承中存在的油膜厚度约 $10\mu\text{m}$ ，而啮合齿轮间生成的油膜厚度与两个接触物体的表面粗糙度同处于相同的数量级，不会大于通过间隙引入到高纯度油中的外来粒子的尺寸。史密斯 (Smith)

认为润滑剂的作用是在极短时间内完成的，因为润滑剂在接触区域的停留时间只有 10^{-6} s。

关于齿轮副润滑问题要叙述的还有很多，例如在《齿轮齿的瞬间摩擦系数》一文，伯尼狄克泰 (Benedict) 等人指出：“从我们的结果中我们不知润滑的真实状态，是流动力润滑，还是弹性流体动力润滑，或者部分流体动力润滑。我们在分析中选择部分流体动力润滑作为一个简单模型帮助理解其结果，为了正确测定润滑状态，似乎需要用一些较直接的方法来测定油膜厚度，而且还要测定油膜的连接性”。

也有的齿轮是在可变的条件下使用，但不可能全面的叙述，只能指出它的主要润滑类型。

伯尼狄克泰指出：“轻负荷高速齿轮可以达到全液膜润滑，重负荷低速齿轮是边界润滑，这是两个极端，然而通常使用的齿轮是混合润滑。”

鉴于以上事实，大多数齿轮副的操作是无故障的。麦卡科努奇指出的极端条件，对于一般的操作是不可能出现的。克鲁克 (Crook) 用电阻作为测定两个金属表面之间的油膜厚度的方法。他指出，厚度 $1\mu\text{m}$ 的流体动力膜在跑合周期后产生。这位作者指出：流体动力膜的存在和观察齿轮表面状态是很一致的，常常是原来加工标迹甚至在使用了20年后还仍被看见，如此低的磨损速度是由于流体动力润滑的结果，而不是边界润滑的结果。

泰勒 (Talley) 等人把一个新的润滑区域定义“金属动力”区域，并被大多数人认可，它处于流体动力区域和边界区域之间。作者详细讨论了这种润滑膜中有关油性的概念，推导并论述了相关的方程。研究的问题是有关轴颈轴承的，对齿轮润滑理论有兴趣的人们也应该知道这些设想。

兰森 (Lasen) 等人指出，在齿轮运行中存在一些边界润滑的复合效应，特别是达到高温时，下面的任何一个反应对齿轮润滑都有影响：金属表面的氧化；润滑剂氧化生成脂肪酸；极性物质，例如脂肪酸，在金属表面的化学吸附或物理吸附；由上述的脂肪酸吸附生成的多层膜，由酸同金属氧化物反应生成的盐形成多层膜，由存在的酯形成的多层膜；油或不饱和组分的氧化或聚合生成树脂状膜；由于压力和剪切应力使这些后来的膜定向；或刚才所说的任何一种膜的破坏。

齿轮润滑剂工作条件似乎十分苛刻，但可以认为普通工作条件并不十分苛刻，齿轮副和润滑剂的生产厂在他们的产品中要留有充分的余地，然而对齿轮操作者来说，指出这些可能的条件是应该的，以便提供适宜的工作条件，避免过分的磨损甚至破坏。

二、齿轮润滑剂的作用

研究齿轮润滑剂的作用是为了研究满意的齿轮润滑剂所需具备的特性和怎样发挥其作用，用途不同，齿轮润滑剂的作用也不同。下面列出齿轮油最重要的作用：

- (1) 减少齿轮和相邻运动零件的磨损；
- (2) 减少摩擦力和功；
- (3) 散热，即起冷却剂的作用；
- (4) 减少噪音、振动和齿轮间的冲击；
- (5) 排除脏物；
- (6) 对添加剂起载体作用；
- (7) 起结构材料的作用，润滑剂是防止破裂、点蚀、胶合、决定齿轮强度的一个因素。

(1)~(6)的作用，在很多书中都详细记载，在此不作细述，而仅对(7)作进一步的说明。

如何理解“作为结构材料的齿轮润滑剂”，因为没有适当的润滑剂，齿轮副不能起作用。早在1942年艾伦曼 (Almen) 指出：“常用的齿轮润滑剂能分开两个摩擦表面的液体膜”，因此在某种意义上说齿轮润滑剂也应看作结构材料，它对决定齿轮尺寸是一个很重要的因素。

最近布鲁克 (Blok) 在“齿轮润滑剂作为结构元件”的一篇论文中指出设计齿轮副要记住：润滑剂应该被想象成结构材料，即使在早期的设计阶段，也要对它的结构性质，例如粘度和抗胶合性质加以计算。

因此布鲁克绘制了一条传递动力和速度的关系曲线，该曲线说明了一个界限，如果要增加齿轮的载荷能力，可通过改进材料或采用特殊润滑剂来扩大界限。

以上结论可从广州机床研究所的“工业齿轮油应用技术的研究”模拟试验报告的有关数据中得到证实。在IAE试验机齿轮转速为4000r/min条件下，3种不同类型的润滑油（其中有机械油、低极压工业齿轮油、中极压工业齿轮油）和4种不同的粘度（N68、N100、N220、N460）在齿轮条件不变下具有明显不同的承载能力。其中机械油承载能力最低，即N68机械油在载荷为1021MPa下，其齿轮完全失效，而N68中极压工业齿轮油却在2152MPa条件下才完全失效，对同一类油品，粘度高，其承压能力高，如N68机械油，其失效载荷为1021MPa，而N460机械油却为1665MPa。

三、对齿轮润滑剂所要求的特性

在讨论齿轮润滑剂时，一些优良的特性会有助于这些产品得到满意的应用，具体有下列特性要求：

- (1) 粘附性
- (2) 配伍性；
- (3) 抗分离性；
- (4) 对机构的其它部件例如密封件等的最小影响；
- (5) 油性；
- (6) 氧化稳定性；
- (7) 良好的破乳化性；
- (8) 良好的洗净性；
- (9) 良好的油膜强度；
- (10) 良好的抗泡沫性；
- (11) 良好的粘温特性；
- (12) 剪切稳定性；
- (13) 不高的成本。

在这里仅谈配伍性和抗分离性，其它请参看有关书籍。

齿轮油的配伍性：

在一定室温下由直馏矿物油组成的齿轮润滑剂可以任意比例混合，混合物的物理特性不是严格地按比例平均。

另一方面，含有添加剂的齿轮润滑剂，由于混合不同组分的添加剂，其化学性质或物理性质可以变化。例如一些极压添加剂限制了在高粘度指数油中的可溶性。这样的添加剂与环烷烃油溶合，环烷烃油使添加剂悬浮，这种混合物依次与高粘度指数油混合，一部分的添加剂可从混合物中沉淀出来，如果含有铅皂的齿轮油同另一种含有硫化物的齿轮油混合，可以

生成硫化铅沉淀。了解各种齿轮油配伍性对于加油或换油具有指导意义，以免在使用不同齿轮油时出现不必要的沉淀。

齿轮油的抗分离性：

在含有多种极压添加剂的齿轮油中，有时会出现某些组分的沉淀或软泥现象，这可能是由于某些添加剂在基础油中的溶解度小或是由于两种添加剂在使用过程中发生化学反应而造成的。加入到齿轮油中的添加剂的比例一般都超过9%，因此，各炼油厂在调配齿轮油过程中，在选择基础油组分和添加剂品种时，要选择溶解度大些的基础油组分和添加剂以及在使用过程中不能互相发生化学反应的添加剂，以减少添加剂组分的分离作用。

当然，在齿轮润滑剂中产生沉淀或软泥，使有价值的活化组分的比例降低，但最使人担心是软泥对运转机构的影响，因此法莱希 (Flecher) 指出，在传动中由于离心作用出现的软泥沉淀可产生碳状沉淀残留在轴承保持架、内离合器以及油箱中油槽、同步器槽等零件上面，这些沉积物非常有害，影响机器的正常运转，为此一些设备生产厂规定在他们的设备中安装过滤装置，以将软泥过滤掉。

在极压齿轮油中软泥的生成是由于高温作用，也可能是极压添加剂的化合物反应的结果，对于这种软泥，清净添加剂是无效的，只能让油厂在生产中选择适当的极压添加剂时加以考虑。

四、选择齿轮润滑油的几种典型方法

(一) AGMA标准规范“工业闭式齿轮传动的润滑”

利用经验数据来选择齿轮所用的齿轮油类型和粘度，在这方面典型的例子是美国齿轮制造商会AGMA标准规范中关于工业闭式齿轮传动润滑的有关表格数据。

从表1-1看出，在一定操作条件下，正齿轮，斜齿轮、伞齿轮的润滑要求是一样的，由于蜗轮副的速度高而且接触面积大，要求油有特殊的添加剂，极压油和复合油都可能达到满意的结果。大部分蜗轮制造厂推荐使用复合油，因为脂肪酸添加剂能减少摩擦和稍微提高蜗轮副较低的传递效率。双曲线齿轮必须使用极压油，因为它承受重负荷和很高的滑动速度。

表1-2和表1-3分别表明美国AGMA润滑剂类型、粘度等级和根据各种类型齿轮的中心距和环境温度来选择油品的粘度。

表1-1只是选择油品的大致分类，不够准确，如果齿轮生产厂没有推荐采用哪类齿轮油时，其用户也难以正确选用。

(二) DIN 51509 Teil 1 齿轮润滑油的选择

应用本标准举例说明：

例1: B2152龙门铣头减速箱，

已知齿宽 $b=60\text{mm}$ ，齿数 $Z_1=20$ ，模数 $m=5\text{mm}$ $i=3$

小齿轮节圆直径 $d_1=Z_1 \cdot m=20 \times 5=100\text{mm}=10\text{cm}$

$$\text{圆周速度 } u = \frac{d_1 n}{1910} = \frac{10 \times 1400}{1910} = 7.33\text{m/s}$$

$$\text{圆周力 } F_t = \frac{75}{u} N = \frac{75 \times 16.2 \times 1.36}{7.33} = 225.4\text{kg} = 2209\text{N}$$

Stribeck滚动压力 K_s 计算如下（若求近似值，齿侧因数 Z_H 的平方和啮合面因数 Z 的平方可取3）

表 1-2 美国AGMA润滑剂的粘度范围

(R & O)型齿轮油 (AGMA润滑剂牌号)	粘度范围, mm ² /s ^① (40℃)	相应的 ISO 粘度等级 ^②	EP型齿轮油(AGMA 润滑剂编号) ^③	AGMA以前的粘度系统 [SSU, 37.8℃(100°F)] ^④
1	41.4~50.6	46		193~235
2	61.2~74.8	68	2EP	284~347
3	90~110	100	3EP	417~510
4	135~165	150	4EP	626~765
5	198~242	220	5EP	918~1122
6	288~352	320	6EP	1335~1632
7 comp ^⑤	414~506	460	7EP	1919~2346
8 comp ^⑤	612~748	680	8EP	2837~3467
8Acomp ^⑥	900~1100	1000	8AEP	4171~5098

注: AGMA润滑剂的粘度范围标准制订在ASTM的同类标准之前(请看注脚^①);

① ASTM 2422为工业液体润滑剂的粘度系统, 它同于英国标准学会的 B.S.4231标准;

② ISO 3448为工业液体润滑剂——ISO粘度等级分类;

③ EP 齿轮油只在齿轮制造厂的推荐下使用;

④ AGMA 250.03制订于1972年5月, 而AGMA 251.02制订于1974年10月;

⑤ 符号comp, 是表明在基础油中加入3~10%脂肪油或合成脂肪油。

此表来自 AGMA 250.04标准“工业封闭齿轮传动的润滑, 1974年批准”。

表 1-3 由美国AGMA推荐的关于闭式的斜齿、人字齿、直齿锥齿、
螺旋锥齿和正齿轮装置的AGMA润滑剂牌号数

低 速 齿 轮		AGMA 润滑剂号码数 ^{②③}	
装置的类型 ^①	中心距, mm	环 境 温 度 ^④	
		-10~10℃ ^⑤	10~50℃
平行轴 (单级减速)	<200	2~3	3~4
	200~500	2~3	4~5
	>500	3~4	4~5
平行轴 (双级减速)	<200	2~3	3~4
	>200	3~4	4~5
平行轴 (三级减速)	<200	2~3	3~4
	200~500	3~4	4~5
	>500	4~5	5~6
行星齿轮箱 壳体外径	φ<400	2~3	3~4
	φ>400	3~4	4~5

低 速 齿 轮		AGMA 润 滑 剂 号 码 数 ^{②③}	
装 置 的 类 型 ^①	中 心 距, mm	环 境 温 度 ^④	
		-10~10℃ ^⑤	10~50℃
螺旋锥齿轮或直齿锥齿轮 锥母线	<300	2~3	4~5
	>300	3~4	5~6
齿轮马达		2~3	4~5
高速齿轮装置 ^⑥		1	2

① 由于某些润滑剂类型对离合器性能起到相反的作用, 为此对于那些在齿轮驱动系统中引入高离合器作为棘爪的机构, 使用的齿轮油应根据齿轮制造厂的推荐。

② 表中所推荐的润滑剂号码数的性能, 在工作条件如表面粗糙度、温升、负荷、速度等发生变化时也能满足其要求。

③ AGMA 润滑剂粘度等级号码数, 可以采用 R & O 型齿轮油, 也可以采用相应粘度等级的极压齿轮油 (如果齿轮制造厂认为必要)。

④ 如果环境温度超出表中所列的范围, 可以与齿轮制造商商量采用合成润滑剂, 因此某些类型合成润滑剂能成功应用于高低温领域。

⑤ 所选用的油品的凝点最低不能低于最小的环境起始温度 5℃。如果环境的起始温度接近于润滑剂的凝点, 就要求油箱安装加热器, 以便于启动和保证正确的润滑。

⑥ 所谓高速是指当速度大于 3600r/min 或圆周速度大于 25m/s (5000r/min) 或者两个数据都超过, 对于这种高速运转的齿轮的润滑可参考 AGMA421“高速斜齿轮和人字齿轮的实践”一文。

本表选自 AGMA 250.04“工业封闭齿轮传动的润滑”。

$$K_s = \frac{F_t}{bd_1} \times \frac{i+1}{i} \cdot Z_H^2 \cdot Z_\epsilon^2 = \frac{2209}{60 \times 100} \times \frac{4}{3} \times 3 = 1.47 \text{ MPa}$$

因 K_s 小于 7.5 MPa, 所以该机床减速箱可选用防锈抗氧工业齿轮油。

下面确定选用油品的粘度:

$$\text{力速因数 } \frac{K_s}{u} = \frac{1.47}{7.33} = 0.2 \text{ MPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$$

根据 $\frac{K_s}{u} = 0.2$ 从图 1-1 中查出油品粘度为 60 mm²/s (50℃)。

例 2: 葛洲坝水电水工厂 2×160t 弧门起闭机 Z285 减速箱第二级有关参数计算如下
已知 $b=200\text{mm}$, $i_1=7.7$, $i_2=6.6$

$$d_1 = Z \cdot m = 13 \times 10 = 130 \text{ mm} = 13 \text{ cm}$$

$$u = \frac{d_1 n}{1910} = \frac{13 \times \frac{580}{7.7}}{1910} = 0.51 \text{ m/s}$$

$$F_t = \frac{75N}{u} = \frac{75 \times 45 \times 1.36}{0.51} = 9000 \text{ kg} = 88200 \text{ N}$$